



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Producción de Biogás a partir del extracto del follaje
de la planta de Marango (*Moringa oleifera* L.)
utilizando un digestor UASB a escala piloto.”

Presentado por:

Br. Ivania del Carmen Alejo Ñurinda.

Br. Manuel Antonio Vega González.

Tutora: Dra. Gabriele Foidl

Asesor: M.Sc. Ing. Ernesto Acevedo Lugo

Trabajo para optar al título de:

Ingeniero Químico

Managua, 11 de Abril de 2007.

A honorables miembros del jurado:

El presente trabajo de tesis realizado por los Brs. Ivania del Carmen Alejo Ñurinda y Manuel Antonio Vega González fue producto del esfuerzo común donde cada problema fue discutido y en lo posible resuelto con la venia de ambos tesisistas.

Con mucha dedicación y esmero se dieron a la tarea de investigar el comportamiento de dos tipos de tratamientos anaerobios al que se sometió el extracto de Marango, uno de ellos estipuló un tratamiento de floculación previo a alimentarse al digestor. Los digestores utilizados eran de tipo UASB, los cuales son muy frecuentes para el tratamiento de desechos por medio de digestión anaerobia.

A lo largo de esta labor se tuvieron que superar problemas técnicos en relación a servicios básicos y de abastecimiento de materia prima (variabilidad en la DQO), siendo los primeros los de mayor relevancia.

Los mejores resultados de productividad y rendimiento se obtuvieron del digestor que operó con sustrato floculado, éste además demostró tener mejor capacidad de soportar cambios de carga, en comparación al sustrato que no fue sometido a este pretratamiento, el cual reaccionó con mucha sensibilidad y mayor tendencia a acidificarse.

En consecuencia a lo anteriormente expuesto quisiera solicitar a los honorables miembros del jurado que acepten este estudio monográfico y le otorguen a los Brs. Ivania Alejo y Manuel Vega el título de Ingeniero Químico por haber cumplido considerablemente con los requisitos en su trabajo de tesis.


Dra. Gabriele Foidl

DEDICATORIA

A Dios que me guía y me da sabiduría para llevar su bendición en el transcurso de mi vida.

A mis padres que cultivaron ese amor en mí y son los que llenaron el corazón de valores, sacrificios, enseñanzas y dieron siempre su apoyo para seguir adelante para terminar mis estudios.

Ivania Alejo.

A mis padres y a todos lo que han creído en mí y lo seguirán haciendo.

Manuel Vega.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y a nuestros padres por darnos la fortaleza y el entusiasmo para realizar este proyecto.

Al departamento de Biomasa, por habernos brindado todo el apoyo técnico y material sin el cual no hubiese sido posible la realización de este estudio: **Ing. Leonardo Mayorga** (Director), **Lic. Enrique Miranda** (Administrador), **M.Sc. Ing. Eduardo Zamora** (Jefe de laboratorio) y a todas aquellas personas que dieron su apoyo.

A nuestra tutora **Dra. Gabriele Foidl** por guiarnos y motivarnos en la conclusión de la tesis.

A nuestro asesor **M.Sc. Ing. Ernesto Acevedo** cuyos aportes fueron fundamentales para la conclusión del trabajo.

De manera muy especial al **M.Sc. Ing. Néstor Fong Jorge**, por su apoyo desmedido y desinteresado en el desarrollo de este trabajo monográfico y por su amistad brindada, gracias.

A **Doña Fran** por ayudarnos y estimularnos a continuar con esta difícil tarea.

RESUMEN

El presente trabajo se efectuó con el propósito de determinar el potencial de producción de biogás que tiene el extracto del follaje de marango (*Moringa Oleífera* L.) al ser sometido a digestión anaerobia. Para tal fin se hicieron ensayos en paralelo en dos digestores de tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) de 82 litros de volumen útil, alimentado uno de ellos con extracto de marango bruto (Digestor A) y otro con extracto previamente floculado (Digestor B).

Se determinaron parámetros fisicoquímicos de los sustratos comprobándose que son de carácter ácido, con altas cargas orgánicas y suficiente cantidad de nitrógeno, aunque para el sustrato floculado estas dos últimas características corresponden casi a la mitad del sustrato no floculado. Ambos digestores se inocularon para el proceso de arranque y fue necesaria la dilución de los respectivos sustratos por su alto contenido de DQO.

La carga orgánica se aumentó gradualmente en función principalmente del comportamiento de los digestores en cuanto al factor de alcalinidad, parámetro básico con el que se monitoreó la estabilidad.

Los mejores resultados en el digestor A se obtuvieron a cargas 3.5 – 4.5 gDQO//d, con una productividad alrededor de 0.95 lbiogás//digestor y rendimientos próximos a 0.26 lCH₄/gDQO. Con respecto al digestor B los mejores resultados se obtuvieron a cargas entre 4 – 5.5 gDQO//d, con una productividad aproximada de 0.99 lbiogás//digestor y rendimientos cercanos a 0.3 lCH₄/gDQO.

El digestor B presentó una mejor tendencia a la estabilidad con respecto a los aumentos en la carga. Por otra parte el digestor A fue más propenso a la acidificación a cargas mayores de 3.5 gDQO//d.

La calidad del biogás en ambos digestores mantuvo valores superiores al 60% de metano. Los resultados demuestran que el extracto de marango sometido a digestión anaerobia generó biogás en cantidad y calidad suficiente para ser utilizado como fuente alterna de energía.

INDICE

	Página
Carta del tutor	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento	V
Resumen	VI
Índice	VII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	X
Índice de Anexos	XI
I.- Introducción	1
II.- Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
III. Justificación	4
IV.- Marco Teórico	5
4.1.- Definición	5
4.1.1.- Biogás	5
4.1.1.1.- Propiedades	6
4.1.1.2.-Usos	6
4.1.1.3.- Beneficios de la tecnología del biogás	7
4.1.2.- Marango	8
4.1.2.1.- Descripción	8
4.1.2.2.- Usos del Marango	9
4.2.- Obtención de biogás a partir de desechos orgánicos	10
4.3.- Principios de la digestión anaerobia	11
4.3.1.- Etapas de la digestión anaerobia	11
4.3.2.- Factores importantes en el control de la digestión anaerobia	15
4.4.- Digestores anaerobios	20
4.4.1.- Digestores clásicos	20
4.4.2.- Digestores sencillos	21
4.4.2.1.- Digestor de cubierta fija (Tipo Chino)	21
4.4.2.2.- Digestor de cúpula flotante (Tipo Hindú)	22
4.4.2.3.- Digestor esférico	23
4.4.3.- Digestores modernos	23
4.4.3.1.- Digestor de biopelícula (biodisco)	24

4.4.3.2.- Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)	25
4.4.3.3.- Digestor de flujo pistón	26
4.4.3.4.- Digestor de lecho fangoso (UASB)	27
4.4.3.4.1 Descripción y funcionamiento (Reactor UASB)	29
4.4.4.- Causas típicas que conducen a la inestabilidad de un digestor anaerobio	29
4.4.5-Parámetros para tener un buen funcionamiento de un digestor.	30
V.- Diseño Metodológico (Material y Método)	33
5.1.- Diagrama de las instalaciones	33
5.2.- Método	35
5.2.1- Preparación de los sustratos	35
5.2.2.- Caracterización de los sustratos	36
5.3.-Arranque de los digestores	36
5.4.- Operación y control de los digestores	37
5.5.- Problemas de operación	39
VI.- Presentación y Discusión de Resultados	40
6.1.- Caracterización del sustrato	40
6.2.- Esquema de carga aplicada	41
6.3.- Comportamiento del pH	45
6.4.- Factor de alcalinidad	48
6.5.- Remoción de DQO	51
6.6.- Producción y calidad del biogás	53
6.7.-Productividad	57
6.8.-Rendimiento	60
6.9.-Comportamiento del nitrógeno	62
6.10.- Comportamientos de los sólidos	65
6.11.-Temperatura	68
VII.- Conclusiones	70
VIII.- Recomendaciones	74
IX.- Nomenclatura	75
9.1.- Glosario	75
9.2.-Simbología	78
X.- Bibliografía	80
XI.- Anexos	85

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura No.1. Usos más comunes del biogás	6
Figura No.2. Descomposición de la materia en ambiente anaerobio.	10
Figura No.3. Proceso de digestión anaerobia.	14
Figura No.4. Esquema general de digestores clásicos.	20
Figura No.5. Digestor de cubierta fija.	21
Figura No.6 Digestor de cúpula flotante.	22
Figura No.7. Reactor anaeróbico de biopelícula.	24
Figura No.8. Reactor anaeróbico de flujo ascendente.	25
Figura No.9. Esquema de digestores de flujo pistón.	26
Figura No.10. Reactor UASB.	27
Figura No.11. Diagrama de las instalaciones para un módulo de digestión	34
Figura No.12. Esquema de carga. Digestor A (Sustrato no floculado)	41
FIGURA NO.13. Esquema de carga. Digestor B (Sustrato floculado).	44
Figura No.14. Comportamiento del pH en el digestor A	46
Figura No.15 Comportamiento del pH en el digestor B	47
Figura No.16 Comportamiento de alcalinidad en el digestor A en función de la carga	48
Figura No.17. Comportamiento de alcalinidad en el digestor B en función de la carga	50
Figura No.18. Porcentaje de remoción DQO en relación a la COV del digestor A.	51
Figura No.19. Porcentaje de remoción DQO en relación a la COV del digestor B.	53
Figura No.20. Producción y calidad de biogás. Digestor A	54
Figura No.21.Producción y calidad de biogás. Digestor B.	56
Figura No.22. Productividad en función de la carga orgánica. Digestor A.	58
Figura No.23. Productividad en función de la carga orgánica. Digestor B.	59
Figura No.24. Rendimiento del digestor A en función de la carga.	61
Figura No.25. Rendimiento del digestor B en función de la carga.	62
Figura No.26. Nitrógeno total vs. Nitrógeno amoniacal. Digestor A.	63
Figura No.27. Nitrógeno total vs. Nitrógeno amoniacal. Digestor B.	64
Figura No.28. Comportamiento de sólidos en el digestor A.	66
Figura No.29. Comportamiento de sólidos en el digestor B.	67
Figura No.30. Temperatura de operación en el digestor A.	68
Figura. No 31. Temperatura de operación en el digestor B	69

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Rangos de temperaturas y tiempos de retención	15
Tabla No.2. Valores de pH para la producción de biogás	16
Tabla No. 3. Recopilación de los análisis realizados a los sustratos y los métodos utilizados.	36
Tabla No. 4. Parámetros físico-químicos de control.	38
Tabla No.5. Características fisicoquímicas promedios de los sustrato A y B.	40
Tabla No.6. Comportamiento de la DQO con respecto al tiempo de hidrólisis.	40

ANEXOS

	Página
ANEXOS A: TABLAS DE RESULTADOS DIGESTOR A	85
A.1.-. Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad en el digestor A.	86
A.2.-. Valores diarios de DQO y porcentaje de remoción en el digestor A.	91
A.3.-. Valores diarios de producción, productividad y rendimiento. Calidad de biogás (porcentajes de metano en el digestor A).	96
A.4.-. Concentración de nitrógeno Total. Relación DQO : NT en el digestor A.	101
A.5.-. Concentración de nitrógeno amoniacal. Digestor A.	101
A.6.-.. Comportamiento de sólidos suspendidos en el digestor A.	102
ANEXOS B: TABLAS DE RESULTADOS DIGESTOR B	103
B.1.-.. Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B.	104
B.2.-. Valores diarios de DQO y porcentaje de remoción en el digestor B.	109
B.3.-. Valores diarios de producción, productividad y rendimiento. Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B.	114
B.4.-. Concentración de nitrógeno Total. Relación DQO:NT en el digestor.	120
B.5.-. Concentración de nitrógeno amoniacal en el digestor B.	120
B.6.-. Comportamiento de sólidos suspendidos en el digestor B.	121
C.1.-. Parámetros fisicoquímicos de los sustratos floculado y no floculado	122
C.2.-. Caracterización de lodos de los digestores A y B.	122
D.1.-. Datos Técnicos de los equipos utilizados.	123
ANEXOS E: FIGURAS	124
E.1.-. Rendimiento vs. Productividad y tiempo de retención.	125
E.2.-. Procedimiento de floculación de proteína	125
E.3.-. Componentes principales de los módulos de digestión	126

I.- INTRODUCCIÓN

La energía ha sido, a través del tiempo, un componente esencial para la sobrevivencia y el desarrollo de la humanidad. El desarrollo del hombre ha estado ligado a la evolución del dominio que él mismo ha ido logrando sobre los diferentes tipos de energía que existe en la naturaleza (Geotérmica, Hidroeléctrica, Eólica, Solar). La energía, como tal, no es una necesidad básica como lo puede ser el agua, el aire, los alimentos, etc., sin embargo es un ingrediente esencial para la satisfacción de éstas.

A nivel global los distintos sectores sociales dependen, casi en su totalidad de la energía producida por el petróleo, el cual no es un recurso renovable. Por esta razón existe la necesidad de buscar fuentes alternas de energía de alto rendimiento, fácil manejo, de fuente no agotable, bajos costos, tanto de producción como de consumo, y que amortigüen el nivel de contaminación ambiental generados por la producción y el consumo de la misma.

El uso de biogás es un rubro no muy potencializado a nivel nacional, las fuentes alternas más comunes son la hidroeléctrica, geotérmica y la solar en menor escala. La materia prima es de amplia variedad y lo más importante es de origen nacional, eliminando así la necesidad de importación.

En Nicaragua se ha difundido la tecnología del biogás, a nivel de pequeño productor y en trabajos de investigación, como una unidad de tratamiento de los desechos agroindustriales y el aprovechamiento del biogás generado por estos, buscando alternativas de fuentes de energía más económica, así como llevarla a zonas que aún no forman parte del sistema nacional de distribución.

Los digestores son fosas o reactores especiales en las cuales se produce gas metano, a través de la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos, como estiércol de animales, desperdicios de comida y rastrojos de siembra.

Entre los modelos existentes de mayor uso se encuentran los digestores semicontinuos de tipo Chino e Hindú, de igual manera existen equipos de régimen continuo, dentro de esta categoría se encuentran los filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA) y reactor de lecho fangoso de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés), los cuales son utilizados fundamentalmente para el tratamiento de aguas residuales provenientes del sector industrial.

En este estudio se utilizará el extracto del follaje de la planta de marango, usando un digestor anaerobio del tipo UASB para la producción de metano a escala piloto en régimen continuo. Así mismo, se pretende determinar la capacidad de producción de metano, el rendimiento del proceso y caracterización de los parámetros más adecuados de operación que sirvan de referencia para estudios posteriores y escalamiento a nivel industrial.

II. - OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la capacidad de producción de biogás a partir del extracto del follaje de la planta de Marango (*Moringa oleifera* L.) utilizando un digestor UASB.

Objetivos específicos

1. Utilizar el extracto del follaje de Marango, fresco y otro previamente floculado, como sustrato para determinar la producción de biogás en dos digestores UASB, de 82 litros de capacidad útil.
2. Caracterizar los sustratos realizando análisis de los siguientes parámetros: DQO, pH, Nitrógeno total, Sólidos (totales y volátiles).
3. Determinar las cargas orgánicas óptimas que permitan el funcionamiento estable y mayor productividad de los digestores.
4. Establecer la carga máxima que soportan los digestores, mediante el aumento gradual en la alimentación.
5. Determinar la calidad del biogás en ambos digestores, por medio del análisis del porcentaje de metano en el biogás.
6. Calcular los rendimientos de producción de biogás en ambos digestores.

III.- JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda del petróleo y su existencia finita han producido una escalada de precios del producto que pareciera no tener fin. La crisis está golpeando con mayor fuerza a los países pobres y extremadamente dependientes del petróleo, como Nicaragua. Se estima que alrededor de las dos terceras partes del petróleo importado en el país se destinan para el consumo del transporte y el tercio restante se utiliza para la generación de energía eléctrica¹. No obstante, Nicaragua cuenta con un enorme potencial de producción de energía renovable, que tiene costos de producción más baratos y estables; tal es el caso de generación de biogás.

La aplicación de la tecnología del biogás ha tenido mayor incidencia en el área rural; dentro de ella se pueden diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es suministrar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía. El segundo está dirigido al sector agrícola y agroindustrial; en este caso con la finalidad de brindar energía, a gran escala, y solucionar graves problemas de contaminación.

Actualmente se está retomando el interés por desarrollar la tecnología del biogás, mediante digestores de altos rendimientos (en comparación con los de uso tradicional), a partir del descubrimiento del potencial energético contenido en el marango, el que cultivado bajo riego, podría producir anualmente 25 mil metros cúbicos² de gas metano por hectárea, lo que es equivalente a la energía contenida en 6,658 galones de diesel.

Con la realización de este trabajo se pretende implementar el uso de un digestor del tipo UASB, a nivel piloto, que proporcione los datos de mayor relevancia que afectan la producción de biogás y que sirva de referencia para un posterior escalamiento a nivel industrial, con el propósito de potencializar el uso del mismo como fuente alterna para generación de energía.

¹ INE, 2003.

² El marango ¿segunda independencia nacional?.H. Cuadra. La Prensa.

IV.- MARCO TEÓRICO

4.1.- Definición

4.1.1.- Biogás

El biogás consiste en una mezcla de gases, cuya composición básica es el metano y dióxido de carbono, con la presencia adicional de nitrógeno, amoníaco, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno.

La composición de biogás, depende del tipo de material orgánico que se procesará; donde la cantidad de DQO que contenga el afluente será el parámetro determinante de la producción de biogás. Un gramo de DQO producirá 0.35 litros de metano.

Su composición³ es variable pero en líneas generales sería:

- ∴ Metano (CH_4) = 54 a 70 %
- ∴ Dióxido de carbono (CO_2) = 27 a 45%
- ∴ Nitrógeno (N_2) = 0.5 - 3%
- ∴ Ácido sulfhídrico (H_2S) = Trazas a 0.1 %
- ∴ Hidrógeno (H_2) = 1-10%

A pesar que el ácido sulfhídrico se encuentra en pequeñas cantidades en el biogás, sus efectos son dañinos ya que posee un olor desagradable; además en presencia de agua produce efectos corrosivos ya que cuando se quema es irritante y se convierte en ácido sulfúrico y ácido sulfuroso.

³Disfusión de la tecnología del biogás en Colombia. R. Nigiani. 1987

4.1.1.1.- Propiedades⁴

El metano principal componente del biogás es un gas combustible, incoloro e inodoro, menos denso que el aire, su combustión produce una llama azul y productos no contaminantes.

El poder calorífico del biogás es aproximadamente de 5.975kcal/m³ (CH₄ 70%) valor inferior al del propano y al del butano (22.052 kcal/m³ y 28.588kcal/m³ respectivamente).

El biogás no se licua fácilmente, las condiciones críticas para el metano son de – 82.52°C y 48.5 atmósfera, por lo que no es fácil de comprimir y embotellar como gas licuado (comercial). Un metro cúbico de biogás pesa aproximadamente entre 1.08 – 1.10 kg en condiciones normales (25°C y 1 atmósfera).

4.1.1. 2.- Usos

Este gas se utiliza a niveles industriales para generación de energía eléctrica, en las estaciones de depuración de aguas residuales de las ciudades y también en áreas rurales para cocinar, motores a base de biogás pueden ser utilizados para el bombeo de agua.⁵

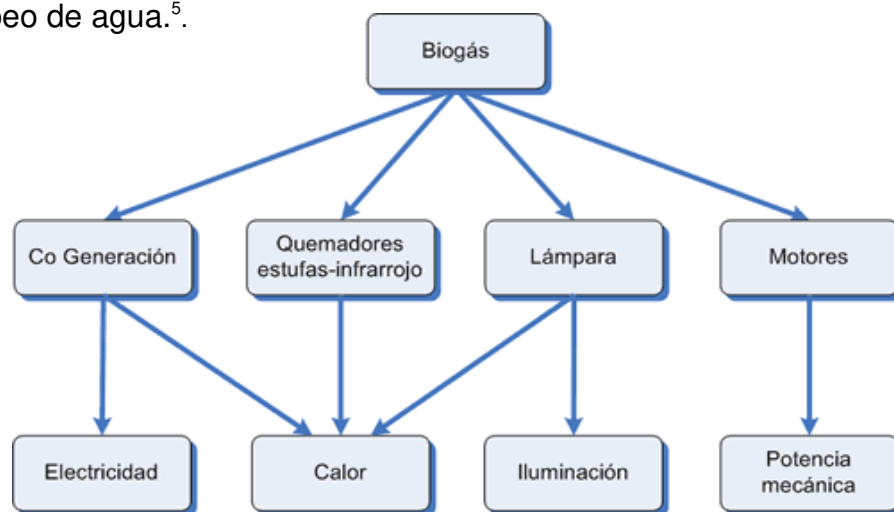


Figura No.1. Usos más comunes del biogás

⁴ Diseño de una planta de biogás en el rastro de Granada. Lorente C. et all.

⁵ www.textoscientificos.com

El uso vehicular del biogás es posible; sin embargo su difusión está limitada por una serie de problemas:

- El gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión; lo cual implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.
- La conversión de los motores es cara y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- Por último la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de producto.

4.1.1.3.- Beneficios de la tecnología del Biogás⁶

Los sistemas de biogás pueden proveer beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general:

- ∴ Producción de energía (calor, luz, electricidad).
- ∴ Transformación de desechos orgánicos en fertilizantes de alta calidad.
- ∴ Mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de microorganismos patógenos.
- ∴ Beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes.
- ∴ Beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía, reducción en los costos de importación de petróleo y de energía eléctrica.

⁶ German Appropriate Technology Exchange: www3.gtz.de/gate/

4.1.2.- MARANGO

4.1.2.1.- Descripción⁷

El marango (*Moringa Oleífera L.*) se encuentra diseminada en gran parte del planeta. En América Central, fue introducida en la segunda década de este siglo como planta ornamental y para cerca viva. Se encuentra en áreas desde el nivel del mar hasta los 1,800 m.s.n.m. y se puede reproducir por semillas o por estacas.

El árbol alcanza de 7 a 12 metros de altura y 20 a 40 cm de diámetro, con una copa abierta, tipo paraguas, hojas compuestas, alternas tripinadas con una longitud total de 30 a 70 cm. Frutos en cápsula trilobulada de 20 a 40 cm longitud, contienen de 12 a 25 semillas por fruto, las semillas son de forma redonda y color castaño oscuro con 3 alas blanquecinas, cada árbol puede producir 15,000 a 25,000 semillas por año.

Tiene una alta tasa de crecimiento y capacidad para producir altas cantidades de materia fresca por metro cuadrado con altas densidades de siembra. Es muy importante señalar el alto rendimiento de materia seca, 5.16 ton/ha/año en ocho cortes por año que se pueden realizar.

El marango posee un alto contenido de proteínas en sus hojas, ramas y tallos. El análisis proteico promedio en materia seca es: hojas 28-30%, ramas y tallos 8%. La planta entera, en masa seca tiene un 10% de azúcar y un 8% de almidón. Sus frutos y flores contienen vitaminas A, B y C y proteínas. Las semillas tienen entre un 30-42% de aceite y su torta contiene un 60% de proteína. No contienen toxinas conocidas.

⁷ Aplicación de Marango (*Moringa Oleífera*) para la clarificación del agua en la potabilizadora de Juigalpa. F. Silva, M. Álvarez. 1998.

4.1.2.2.- Usos del Marango

La planta de marango, que se puede sembrar como una especie de pasto, se caracteriza por su riqueza en contenido vitamínico, minerales y valor energético, y es utilizado en otros países para la alimentación humana por su contenido alto de proteína, vitamina A y vitamina C.

Diferentes partes o productos del marango tienen variedad de aplicaciones por ejemplo:

- Como floculante natural para el tratamiento de aguas residuales como sustituto de sulfato de aluminio.
- Coagulante antibacterial para tratamiento de potabilización del agua.
- Fuente de materia prima de celulosa y de hormonas reguladoras de crecimiento vegetal, alimentos balanceados, fertilizante, forrajes.

4.2.- Obtención de biogás a partir de desechos orgánicos

Si se considera el ambiente bioquímico en el cual pueden ocurrir los procesos de descomposición de la materia orgánica, se advierte que la naturaleza ofrece dos opciones básicas. Una descomposición en ambiente aerobio en el cual el oxígeno actúa como receptor final de los electrones liberados en la degradación y una descomposición en ambiente anaerobio, donde el receptor final es otro agente diferente del oxígeno.

En los procesos anaerobios la energía contenida en los enlaces de los compuestos orgánicos queda en su mayor parte en los enlaces del metano (componente principal del biogás), que da características gaseosas a condiciones normales de presión y temperatura. El resto de la energía queda a disposición de los microorganismos y una parte se disipa en calor.

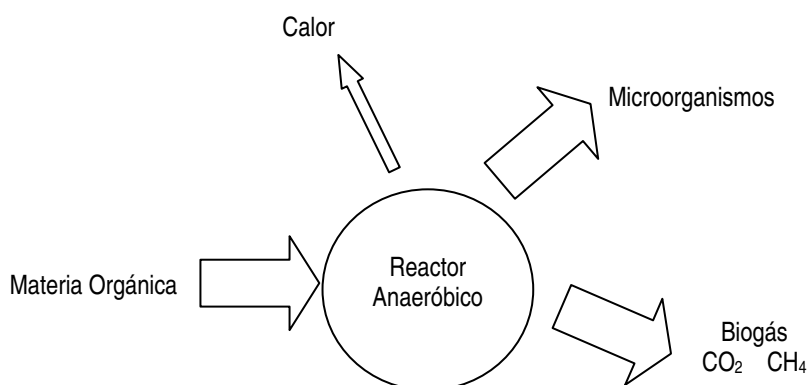


Figura No.2. Descomposición de la materia en ambiente anaerobio⁸.

⁸ "Producción de biogás a partir de la torta de tempate". M. Arbizú. 1993.

4.3.- Principios de la digestión anaerobia

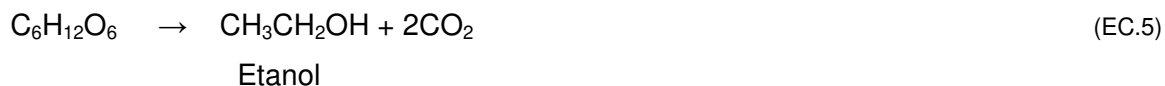
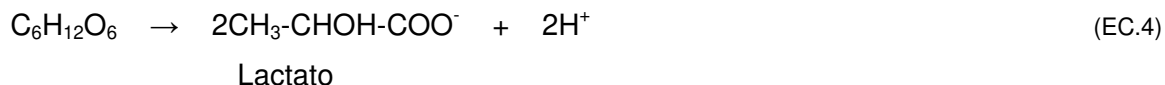
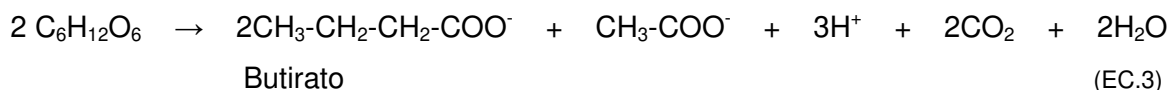
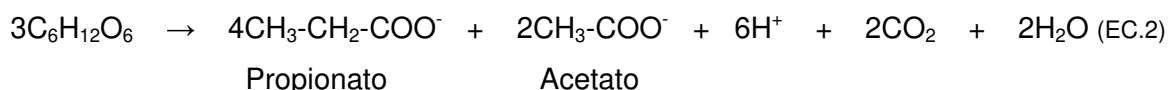
4.3.1.- Etapas de la digestión anaerobia

Por su incapacidad de degradar la biomasa, las bacterias metanogénicas dependen de las bacterias fermentativas, las cuales las abastecen con productos de metabolismo apropiado. La degradación simbiótica de la biomasa se desarrolla en tres etapas:

- **Etapas fermentativa (Acidogénica)**

Consiste en la hidrólisis de los compuestos poliméricos; fermentación de los monómeros en formiato, acetato, propionato, butirato, valerato, etanol, hidrógeno y dióxido de carbono. Las enzimas extracelulares de ciertas bacterias hidrolizan la materia orgánica sólida para ser transformada en materia soluble. Se descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose productos intermedios.

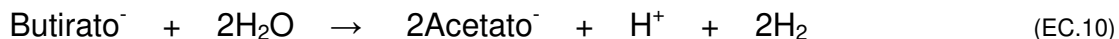
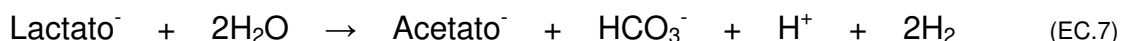
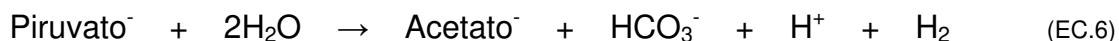
Las reacciones más importantes de la materia solubilizada se describen a continuación:



- **Etapa acetogénica**

Los productos de la primera etapa son transformados a sustancias más sencillas. En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético (acetato), hidrógeno y dióxido de carbono

Las reacciones principales llevadas a cabo en esta etapa son las siguientes:

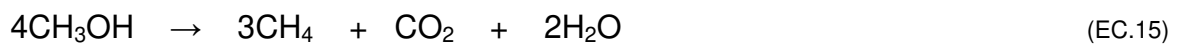
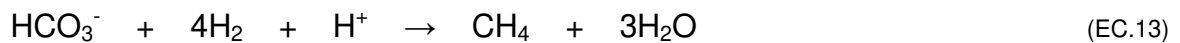
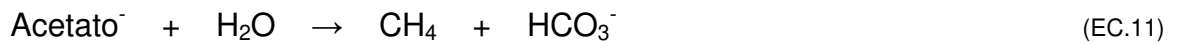


Las dos primeras etapas son consideradas no productoras de metano. En este período, debido a la acción conjunta de varios tipos de microorganismos, la materia prima se convierte en compuestos simples, tales como alcohol, ácido de bajo peso molecular, dióxido de carbono e hidrógeno, los cuales son sustratos para la síntesis de metano. En el período no productor de metano es de vital importancia la presencia de organismos generadores de hidrógeno, ya que éste debe de estar presente a la hora de reducir el dióxido de carbono a metano.

- **Etapa metanogénica**

Los sustratos producidos con anterioridad son transformados a metano por la acción de un grupo particular de bacterias que requieren de un ambiente estrictamente anaerobio, debido a su alta sensibilidad al oxígeno y a otro tipo de agentes oxidantes. En general este grupo de bacterias se denomina bacterias metanogénicas, las más importantes son las que transforman los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás y CO₂.

Bajo condiciones naturales alrededor del 70% del metano se forma a partir del ácido acético, el resto está generado de hidrógeno y dióxido de carbono.



La siguiente figura, resume las distintas características de cada una de las etapas que involucra el proceso de digestión anaerobia, con los principales compuestos químicos que intervienen.

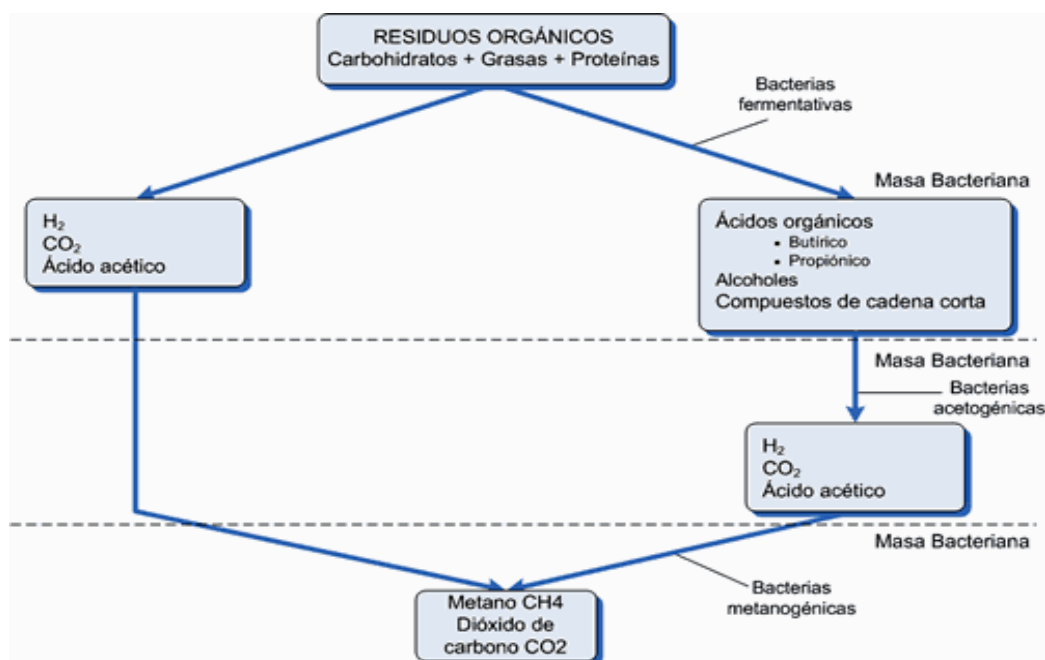
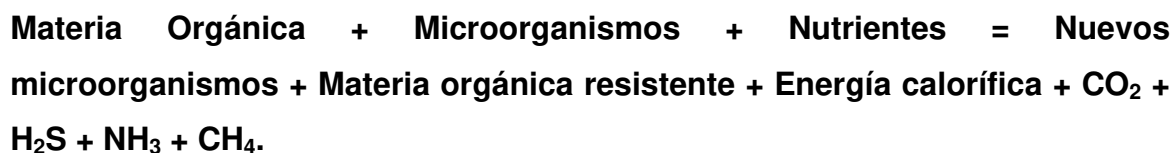


Figura No.3. Proceso de digestión Anaerobia⁹.

En resumen, la reacción química generalizada para la digestión anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



La duración del proceso completo de digestión anaerobia con producción de biogás está determinada por la duración de cada una de las fases individuales del proceso, y la duración de cada una de estas variará según la distribución de los componentes orgánicos, la disponibilidad de nutrientes y de factores físico químicos del medio, principalmente.

⁹ www.textoscientificos.com

4.3.2.- Factores importantes en el control de la digestión anaerobia

- Temperatura:

Existen tres rangos de trabajo para los dos tipos de degradaciones bacterianas existentes:

Tipo de fermentación	Rango de temperatura	Tiempo de retención (días)
Psicrofílica	por debajo de 20°C	Mayor a 100
Mesofílica	entre 20 y 40°C	30 – 40
Termofílica	por encima de los 40°C	Mayor a 8

Tabla 1. Rangos de temperaturas y tiempos de retención

Las bacterias que crecen en las temperaturas moderadas (Psicrofílicos y mesofílicos) son organismos diferentes de los termofílicos, ya que si el intervalo de temperatura en el reactor cambia, es necesario arrancar el reactor de nuevo.

Los cambios de temperatura en el intervalo mesofílico pueden ser tolerados, pero cuando la temperatura desciende, la carga también debe ser disminuida de acuerdo a la actividad esperada. No es aconsejable cambios drásticos en la temperatura de reactores mesofílicos por encima de 42°C, ya que a temperaturas más altas ocurren un rápido deterioro de las bacterias.

Trabajando en el rango termofílico se asegura además la higienización del digerido, puesto que se destruyen patógenos, se esterilizan las semillas y se eliminan las larvas y huevos de insectos, debido a la alta temperatura. Un aumento de la temperatura de digestión tiene el mismo efecto que un aumento del tiempo de retención del sustrato, por lo que una mayor temperatura implicará un menor volumen del reactor. Tienen pues grandes ventajas, pero requieren un mayor control y seguimiento, puesto que a altas temperaturas el nitrógeno amoniacal libre se convierte en inhibidor si este está presente en gran cantidad en el sustrato, también se toma en cuenta el mayor consumo de energía para la calefacción del reactor.

- pH:

Representa la acidez o basicidad del medio. Depende en gran parte del equilibrio del carbono inorgánico (dióxido de carbono /bicarbonato/ carbónico), que define la capacidad tampón (de autorregular el pH) del afluente. Esta capacidad se mide a partir de la alcalinidad.

Está muy relacionado también con la presencia de ácidos volátiles, que son los que se forman en la fases de acidogénesis y que si se acumulan inhiben las bacterias metanogénicas por el descenso del valor de pH.

pH	6.2	Favorece la acidificación
	6.8 – 7.4	Óptimo
	7.6	Favorece amonización

Tabla No.2. Valores de pH para la producción de biogás

- Ácidos grasos volátiles

La concentración de AGV indica cuanta materia prima hay disponible para la producción de metano. Existen sustratos con un alto contenido de AGV además de la cantidad que es generada en la etapa de fermentación. Cuando las bacterias fermentativas tienen una actividad muy alta, pero las bacterias acetogénicas y metanogénicas una muy baja, se podría producir una acumulación de H₂ (la actividad de las bacterias acetogénicas está ligada a una concentración baja de hidrógeno), ácido acético, propiónico y butírico, lo que conllevaría inevitablemente a la acidificación del reactor.

En el caso de ocurrir una sobrecarga los AGV más tóxicos para la metanogénesis son el acético, butírico y el propiónico siendo este último el más peligroso, ya que un aumento en la concentración de $H_2(g)$ provoca la formación de grandes cantidades del mismo. Paralelamente el metabolismo y crecimiento de las bacterias acetogénicas, las cuales podrían invertir este proceso, convirtiendo el ácido propiónico en ácido acético, cesa por el hidrógeno acumulado en el sistema.

La cuantificación de los AGV puede hacerse por varios métodos, un análisis de respuesta inmediata es el control de alcalinidad bicarbonática.

- Alcalinidad

La medida de la alcalinidad informa sobre la capacidad tampón del medio y, por tanto, sobre la resistencia del pH a variar en función de las anomalías de operación en el rango óptimo para el buen funcionamiento de un reactor metanogénico. La capacidad buffer se mide en función de la alcalinidad bicarbonática.

La determinación de la alcalinidad consiste en la valoración titulométrica hasta pH 5.75 que corresponde a la alcalinidad parcial (AP), aportada básicamente por bicarbonato, luego hasta 4.3 que determinará la alcalinidad total (AT). La diferencia entre ambas, alcalinidad intermedia ($AT - AP = AI$) sería la contribuida por las sales de los ácidos grasos volátiles. Como indicador de la sobrecarga resulta todavía más sensible la relación AI/AT , por lo que más que el valor absoluto, es de interés observar la variación de esta relación. Se ha comprobado empíricamente que una relación AI/AT inferior a 0.3^{10} proporciona una correcta estabilidad operacional. Un aumento continuo indica claramente que está teniendo lugar un proceso de desestabilización.

¹⁰ Operación y control de digestores anaerobios. Manuel Soto, et all.

- Sólidos totales y sólidos volátiles

Los sólidos totales representan la porción seca de materia prima (materia orgánica + inorgánica). Los sólidos volátiles representan únicamente la materia orgánica contenida en los sólidos totales. La determinación de estos factores es importante para obtener las materias primas apropiadas para el digestor, porque de ello dependerá el potencial de producción de biogás.

- Tiempo medio de residencia de células (Θ_c):

Se conoce también como tiempo de retención de sólidos (TRS); es el tiempo en días que los sólidos biológicos permanecen en el digestor.

$$\Theta_c = \frac{\text{Sólidos Suspendidos en el digestor}}{\text{Sólidos Suspendidos removidos por día}}$$

Cuando el tiempo de retención disminuye, la concentración de sustrato en el efluente aumenta y la eficiencia de del proceso anaerobio disminuye. Existe un TRS mínimo bajo el cual el proceso falla, debido a que los microorganismos son removidos del digestor más rápidamente de lo que ellos pueden reproducirse. El mínimo se alcanza cuando las concentraciones del sustrato en la alimentación y en el efluente son iguales¹¹.

¹¹Microbiología. Frank Zegers.1987

- Nutrientes

La digestión anaeróbica, por ser un proceso biológico, requiere ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento celular en pequeñas cantidades, como sulfuro, potasio, calcio, magnesio y otros elementos traza como el hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc. Por lo general solamente es necesario determinar el contenido de nitrógeno, carbono y fósforo, para garantizar una adecuada proporción entre ellos y así el correcto desarrollo de la flora bacteriana, esto lleva a una relación mínima de C:N de 5:1 y máxima de 45:1. Hoy en día se indica el requerimiento de nutrientes como la relación de DQO/N/P, la cual para cargas altas debe ser de 350:7:1¹².

Cuando las cantidades de nitrógeno son muy elevadas puede presentarse el efecto inhibidor de iones amonio, el cual es causado por la toxicidad de amoníaco. La disociación del amonio depende fuertemente de la temperatura y del pH sobretodo a valores mayores de 7.4, llegando a concentraciones de amonio entre 1500 – 3000¹³ mg/l las cuales son inhibitorias para las bacterias metanogénicas por la formación de gas amoniaco.

- Inhibidores

Son sustancias que a partir de una cierta concentración inhiben las bacterias, reduciendo la velocidad de reacción, suelen afectar en mayor medida a las etapas acetogénica y metanogénica, ocasionando desde el momento inicial la caída de la producción de metano y la posterior acidificación del reactor. Dependiendo de los efectos que ejerzan, pueden ser considerados como inhibidor metabólico, inhibidor fisiológico o bactericida.

¹² Seminario sobre tratamiento anaerobio de las aguas residuales. Foidl et all. 1994.

¹³ Foidl et all. 1994.

4.4.- Digestores Anaerobios

Generalmente se pueden diferenciar entre 3 diferentes tipos de digestores:

- Digestores clásicos.
- Digestores sencillos.
- Digestores modernos.

4.4.1.- Digestores clásicos

Estos digestores tienen una forma constructiva cilíndrica, cilíndrica-cúbica u ovalada, tienen calefacción y un sistema de agitación. Los digestores más pequeños son construidos en acero o en plástico reforzado con fibra de vidrio. Estos digestores trabajan a temperaturas de 30 - 37°C y con tiempos de retención de 11-30 días. La agitación se efectúa mediante agitadores mecánicos o bombas de recirculación o (a veces) por insuflación de biogás. Estos digestores pueden tener problemas debido a la formación de capas de sedimentos y de costras, las cuales causan una reducción del volumen activo y en seguida una falla por sobrecarga. Sirven para el tratamiento de las aguas negras, así como para la fermentación de estiércol animal.

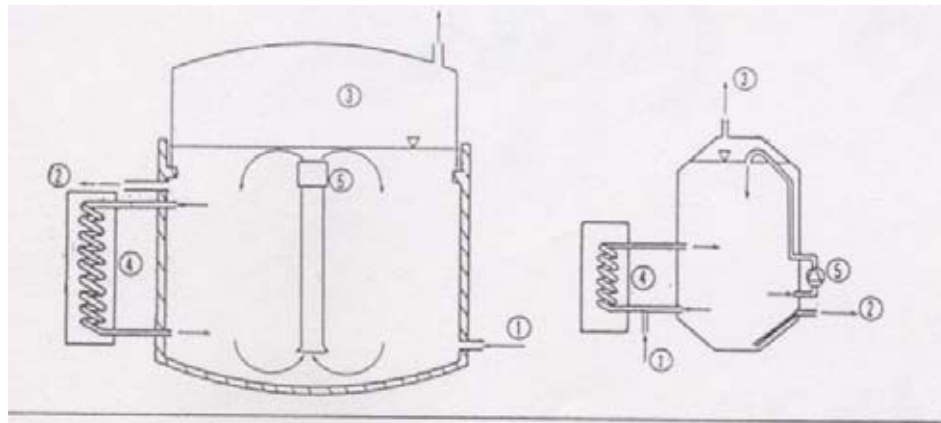


Figura No.4¹⁴. Esquema general de digestores clásicos: 1.Entrada del sustrato.2.Salida del efluente.3.Almacén del gas. 4. Calefacción. 5. Agitación.

Foidl et, all. 1994.

4.4.2.-Digestores Sencillos

4.4.2.1.- Digestor de cubierta fija (Tipo Chino)

Esta es la tipología de planta más sencilla de explotación debido a que no tiene partes móviles, tiene un diseño muy compacto que ahorra espacio, está bien aislada térmicamente, tiene unos costes asequibles y normalmente está enterrada. La construcción es laboriosa y necesita mano de obra con cierta preparación, así como técnicos experimentados en el tema que hagan la supervisión adecuada.

Tiene una vida útil muy larga, que puede ser de 20 años o más, por lo que los costos de amortización de la planta serán relativamente bajos.

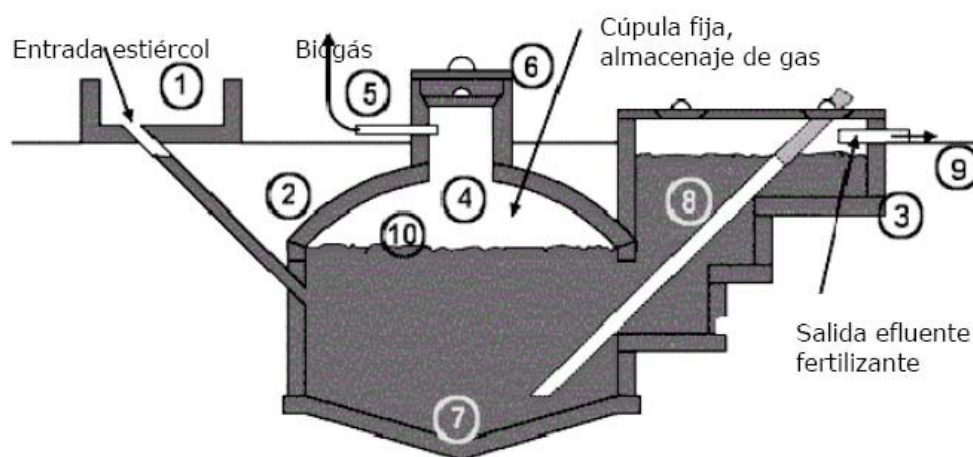


Figura No.5. Digestor de cubierta fija¹⁵.

Las partes del reactor se detallan a continuación:

- 1 Tanque de mezcla, con el conducto de entrada y retención de arenas.
- 2 Digestor.
- 3 Tanque de compensación y de salida.
- 4 Almacenaje de gas.
- 5 Cañería de salida del gas.
- 6 Escotilla de entrada, sellada para evitar fugas de gas.
- 7 Acumulación de lodo denso.
- 8 Cañería de salida.
- 9 Nivel de referencia .
- 10 Espuma sobrenadante.

¹⁵ Digestión Anaerobia para el Tratamiento de Residuos Orgánicos – El Caso Perú

4.4.2.2.-Digestor de cúpula flotante (Tipo Hindú)

Consiste en un digestor subterráneo y una parte móvil superior que sirve de almacén de gas. La cúpula de gas flota directamente sobre el sustrato en digestión o en una película acuosa, disponiendo de algún tipo de guía externa para evitar las desviaciones en la trayectoria de la cúpula y que a la vez permita retirar el tambor flotante para hacer el mantenimiento. El biogás se almacena en la cúpula, desplazándose esta hacia arriba cuando se acumula y hacia abajo cuando este se consume, así que el nivel de la cúpula dependerá del biogás almacenado.

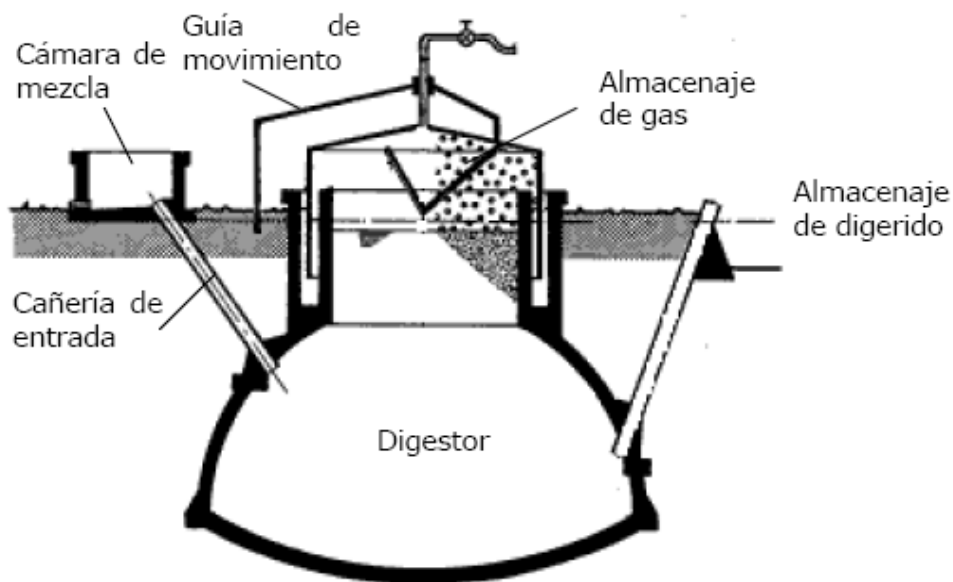


Figura No.6.Digestor de cúpula flotante¹⁶.

¹⁶ Digestión Anaerobia para el Tratamiento de Residuos Orgánicos – El Caso Perú

4.4.2.3.-Digestor esférico

Este tipo de digestor es el más sencillo de los tres. Consiste en una bolsa de plástico o caucho (como por ejemplo PVC) termo soldado que realiza la función de digestor y almacén del gas simultáneamente. La parte superior de la bolsa almacena el gas. Los conductos de entrada y salida se unen directamente a la superficie de la bola. La presión del gas será la que permita la elasticidad del material, o la que se obtenga de disponer pesos en la parte superior de la bolsa. Tienen una vida útil muy corta, de entre 2 a 5 años debido a la naturaleza de los materiales constituyentes.

4.4.3.- Digestores Modernos

En los digestores modernos, el tiempo de retención es uno de los factores más importantes para los costos de construcción de un digestor. Muchos sistemas tratan de disminuir el volumen del reactor por aumento del número de bacterias y así el aumento de la tasa de transformación, aprovechando la disposición de ciertos microorganismos de formar agregados o crecer preferiblemente en superficies accesibles para ellos.

El concepto de biomasa fija o biopelícula es la base de la nueva generación de reactores anaerobios. Esta innovación tecnológica, permitió hacer independientes el tiempo de retención hidráulica (TRH) del tiempo de retención celular (TRC) lo cual permite tener altos TRC con TRH cortos. Esto permite diseñar digestores con volúmenes para tratar afluentes tanto diluidos como concentrados en materia orgánica. Este hecho marca la diferencia con los digestores convencionales y sitúa los nuevos reactores anaerobios como una opción ventajosa frente a los procesos aerobios.

4.4.3.1.- Digestor de biopelícula (biodisco)

Son digestores de última generación, el cual consta con una serie de discos instalados en forma paralela, centradas en un eje giratorio accionado por un motor externo. La biomasa se adhiere a los discos de material poroso.

Los discos se mantienen sumergidos y el reactor es cerrado. La velocidad de rotación debe permitir la adherencia de biomasa en los discos y el desprendimiento del exceso de biomasa retenida en los mismos.

La mezcla ocurre por el propio flujo hidráulico del movimiento de los discos. El líquido ingresa por un extremo inferior y sale por el extremo opuesto superior. A continuación del reactor se debe instalar un sedimentador secundario para la decantación de los lodos que salieron con el efluente.

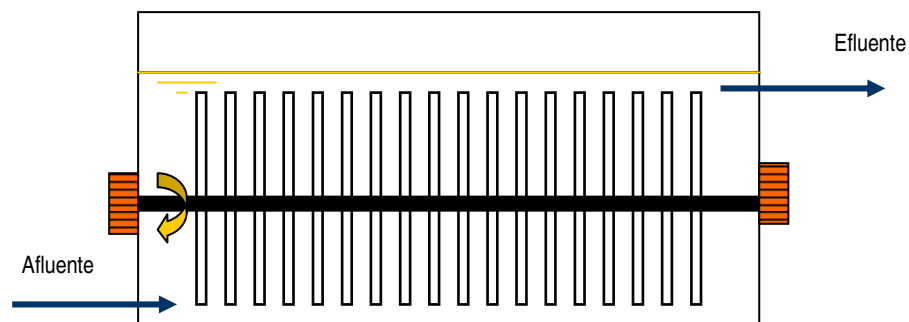


Figura No.7. Reactor anaeróbico de biopelícula¹⁷.

¹⁷ <http://www.ambientum.com/enciclopedia>.

4.4.3.2.- Filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)

El filtro anaeróbico esta lleno de piedras porosas (piedras volcánicas), lo que tiene como desventaja el peso alto y una superficie especifica relativamente pequeña. Por eso muchas veces las piedras son sustituidas por cuerpos llenadores de plástico (por ejemplo, producidos de tubos de plástico de diferentes diámetros), los cuales tienen una superficie especifica mayor.

La mayoría de los filtros trabajan con un flujo ascendente y a veces bajo reciclaje de una parte del efluente. La formación y estabilidad de la película de microorganismos depende de la forma y del dimensionamiento del digestor así como del cuerpo llenador. En caso de una concentración constante del sustrato, la velocidad del flujo del sustrato y la del gas varía en dependencia de la relación de diámetro: altura del reactor cilíndrico.

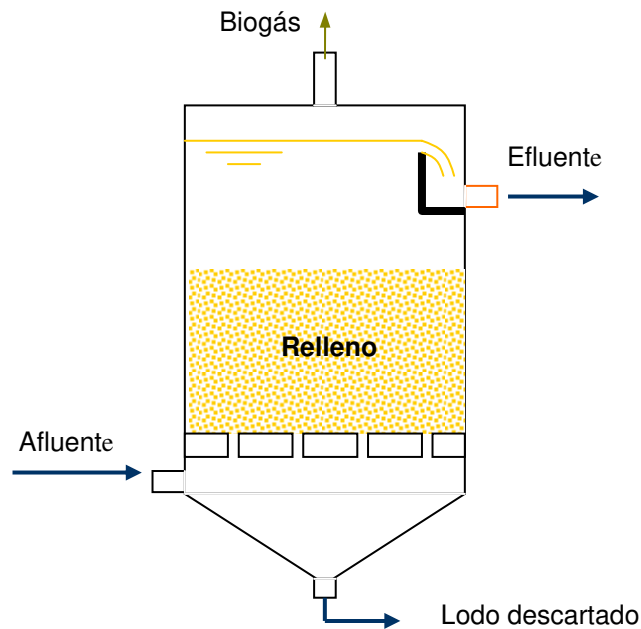


Figura No.8. Reactor anaeróbico de flujo ascendente¹⁸.

¹⁸ <http://www.ambientum.com/enciclopedia>

4.4.3.3.- Digestor de flujo pistón

Digestor anaeróbico que consta de un tubo o recipiente alargado. En la practica estos digestores nunca realmente tienen las características de flujo pistón, porque solamente tienen una relación diámetro/largo de 1:5 hasta 1:10, En dependencia del sustrato y de la existencia de un sistema de agitación, estos sistemas corresponden a reactores no homogéneos o tanques de agitación.

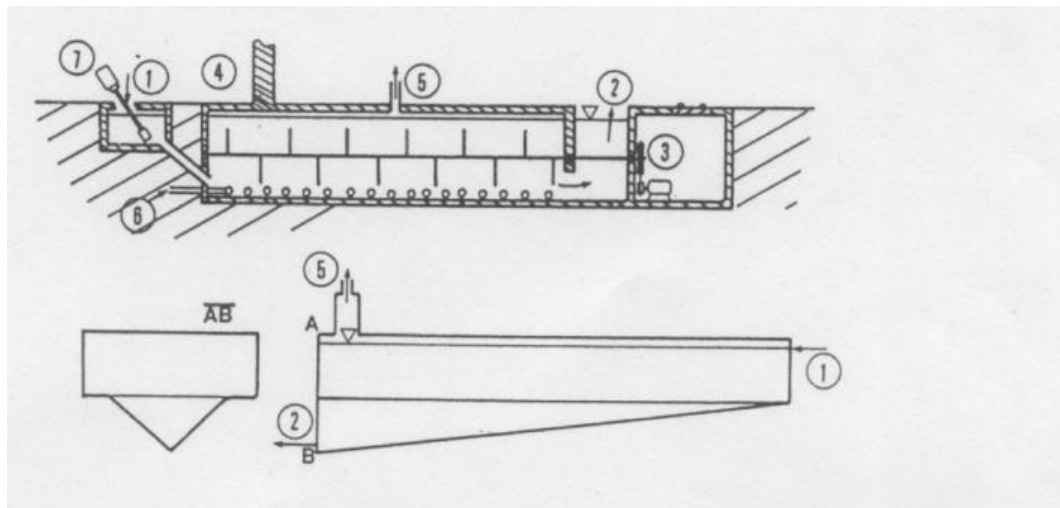


Figura No.9¹⁹. Esquema de digestores de flujo pistón: 1.Entrada del sustrato.2.Salida del efluente.3.Agitador.4. Estabulo.5.Salida del gas.6.Calefacción.

¹⁹ Digestores. Archivos: ASTEC – UNI-BIOMASA

4.4.3.4.- Digestor de lecho fangoso (UASB)

El funcionamiento de un digestor de este tipo depende de la capacidad del lodo de formar agregados (flóculos) y la formación de estos es perjudicada por un alto contenido de ión amonio. El sistema que se conoce como el proceso de “Upflow anaerobic sludge blanket” comprende un digestor y un sistema de desgasificación. El sistema de desgasificación permite la retención de partículas de lodo subiendo por inclusión de gas.

En la fase de arranque, el sustrato debe tener solamente una baja concentración de sólidos totales. Como inóculo sirve generalmente el efluente de digestores que están operando establemente; la carga inicial no debe sobrepasar 0.1 – 0.2 kg DQO o kg de sólidos totales de lodo/m³/día y debe aumentarse lentamente.

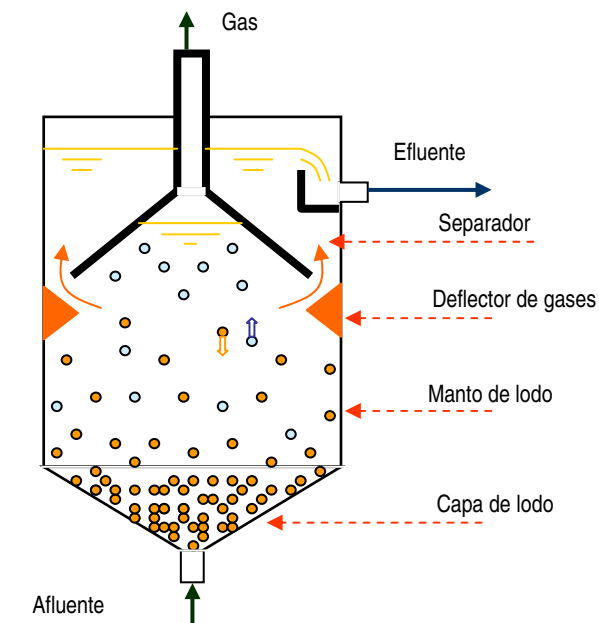


Figura No.10. Reactor UASB²⁰.

²⁰ <http://www.ambientum.com/enciclopedia>.

El sustrato a tratar tiene que ser libre de sustancias finamente dispersas y poco degradables. Un contenido alto de NH_4 en caso de la falta de una cantidad suficiente de cationes divalentes también perjudica la formación de agregados. La formación de un lodo granular depende, entre otros factores, de la concentración de AGV que posee el sustrato.

El lecho fangoso en su mayor parte consiste en bacterias. En comparación con un tanque de agitación o el reactor de biopelícula, la concentración de las bacterias es mucho más alta, lo que posibilita altas tasas de transformación y tiempos de retención muy cortos (5-24 horas). Con reactores UASB se pueden consumir cargas volumétricas mayores que con el proceso de contacto anaerobio (del orden de 10 – 20 kg DQO/m³/día).

Estos digestores trabajan sin agitación adicional (para evitar problemas respecto al lodo granular), la mezcla por la alta velocidad del sustrato y del gas por lo general es suficiente. Solamente en caso de una baja producción de gas, una recirculación de gas u otra mezcla serán necesarias. Para evitar una salida de los agregados con el efluente, se puede combinar el UASB con un filtro anaeróbico , ya que estos pueden ser absorbidos por el material llenador, lo que evita su pérdida.

4.4.3.4.1.- Descripción y funcionamiento (Reactor UASB)

En la zona inferior se desarrolla una capa de lodo concentrado con buenas características de sedimentación.

Sobre esa capa se desarrolla una zona de crecimiento bacteriano más disperso (manto de lodos) en el que los sólidos presentan velocidades de sedimentación más bajas.

En la zona superior hay un separador de gases-sólido-líquido, que ayuda a retener el lodo dentro del reactor.

Sobre el separador se ubica el sedimentador donde el lodo sedimenta y vuelve al compartimiento de digestión.

El sistema es auto mezclado por el movimiento ascendente de las burbujas de gas y del flujo de líquido a través del reactor.

4.4.4.- Causas típicas que conducen a la inestabilidad de un digestor anaerobio

1. Sobrecargas (orgánicas o hidráulicas) del reactor.
2. Descenso o aumento rápido de la temperatura (choque térmico).
3. Aparición en el sistema de sustancias tóxicas o inhibitorias presentes en la corriente de entrada o formadas durante el proceso degradativo.
4. Modificaciones importantes en las condiciones físico-químicas.
5. Modificación en las características internas del reactor.

4.4.5-Parámetros para tener un buen funcionamiento de un digestor

- Carga orgánica

Se define como la concentración de material orgánico, expresado como DQO ó SV del sustrato alimentado por volumen del digestor en un día, cuyas siglas son kg DQO o SV/m³/día. La DQO de un sustrato, la cual será consumida por la bacterias anaeróbicas, puede estar compuesta de sustancias químicas que son fáciles, difíciles (complejos) o imposibles de degradar (compuestos orgánicos inertes)²¹.

La carga es un aspecto importante a considerar en el proceso de digestión anaerobia, una carga insuficiente da como resultado una baja producción de biogás, por otra parte una carga excesiva puede traer como consecuencia desajuste en la actividad relativa de los formadores de ácido y metano a favor de los formadores de ácido.

Se recomienda comenzar con una carga menor de 0.5 kg DQO/m³, aumentándola progresivamente a medida que el sistema va comportándose eficazmente²².

La carga volumétrica máxima depende del sustrato y del tipo de digestor. Con el aumento paulatino de la carga volumétrica se disminuye el rendimiento de gas y el grado de degradación, al mismo tiempo aumenta la productividad de gas hasta un punto crítico para la estabilidad del proceso (igual a la carga volumétrica crítica²³). Una carga volumétrica demasiado alta conduce a un lavado de bacterias o una sobrecarga de las mismas con materia orgánica. Para poder garantizar un transcurso estable de la digestión, es muy importante la determinación de la máxima carga volumétrica²⁴.

²¹ Frank Zegers. 1987.

²² Soto, et all.

²³ Ver anexo E.1.

²⁴ Foidl, et all. 1994.

- Producción de biogás

A una carga constante se espera una producción uniforme de gas, siempre y cuando no exista un cambio en los factores que perturben el proceso. Una disminución en la producción puede indicar problemas en los equipos, en el proceso anaeróbico o error operacional en el manejo del proceso.

El gas tiene un papel importante al generar la mezcla y el contacto necesario entre el afluente y la biomasa. Esta afirmación tiene un poco más de relevancia en un UASB, ya que es uno de los causantes de la expansión del lecho, provocando el lavado del lodo excesivo.

Su contabilidad es importante porque sirve como base de cálculo para determinar el rendimiento ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{degradado}}$) y la productividad ($\text{m}^3\text{gas}/\text{m}^3\text{digestor}$) parámetros importantes para determinar la funcionalidad de los digestores y en base a estos realizar una comparación²⁵.

- Porcentaje de metano.

El análisis del contenido de metano en el biogás es necesario para determinar el valor calórico del biogás el cual depende del porcentaje de metano, se recomienda un mínimo del 55%²⁶ de metano, valores por debajo, aparte de representar una disminución en el valor calórico pueden indicar que existe problemas en el digestor.

²⁵ Elaboración de una propuesta para el tratamiento anaeróbico de las Vinazas a cargas altas. Centeno R. 1994.

²⁶ Foidl, et all.

- Tiempo de retención Hidráulico (T.R.H):

Es el número de días que una cantidad determinada de afluente permanece dentro del digestor. Este tiempo es importante cuando se tiene que tratar volúmenes altos de residuos orgánicos, se requiere entonces tiempos de retención bajos porque de lo contrario el volumen del digestor sería demasiado grande, lo que tiene un efecto directo en la parte económica. Se calcula de la siguiente manera:

$$T.R.H = \frac{\text{volumen útil}}{\text{Caudal (diario)}} \quad (\text{Ec.16})$$

El límite mínimo de los T.R.H. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido, provocando el lavado de la biomasa. En digestores de mezcla completa ha de hacerse necesariamente a tiempos superiores, si queremos evitar el lavado de la biomasa fuera del reactor ya que en ellos el TRH y tiempo de retención de sólidos resultan similares²⁷.

- Dilución

La dilución se puede realizar con agua corriente. Juega un papel importante en el arranque de los digestores, sobre todo cuando el sustrato a tratar es de alta concentración de material orgánico, ya que de alimentar sin dilución puede ocasionar inestabilidad insuperable en la población de bacterias necesarias para la descomposición del residuo, impidiendo el arranque del digestor.

²⁷ Uso de un digestor UASB para el tratamiento anaeróbico de vinaza de melaza de caña. Sánchez, et all. 1985.

V.- DISEÑO METODOLÓGICO (MATERIAL Y MÉTODO)

5.1.- Diagrama de las instalaciones²⁸

La fase experimental fue realizada en dos módulos de digestión, cada uno de ellos conformado por dos tanques en serie; los primeros son tanques de alimentación de 41 l de capacidad provisto de recirculación para mantener la homogeneidad del sustrato en ambos módulos, los segundos tanques corresponden a los digestores, los cuales tienen forma cilíndrica con fondo cónico, con 82 l de volumen útil.

Los digestores se equiparon con los accesorios necesarios para su correcta operación: trampas de gas, contadores de gas, bombas de alimentación, bombas de recirculación y sondas térmicas, estas dos últimas se conectaron después de iniciar operaciones con el propósito de mejorar la producción de biogás.

Previo a la alimentación a los dos módulos, los sustratos correspondientes se sometieron a hidrólisis por un período de 48 horas en dos recipientes plásticos. Posteriormente se diluyeron en función de la carga orgánica a aplicar y se alimentaron de forma manual a los tanques de alimentación, por la parte superior. Dos bombas dosificadoras alimentaban los digestores con sustrato procedente de los tanques de alimentación; además se instalaron sondas térmicas con el fin de mantener la temperatura dentro del digestor próxima a los 37°C.

La salida de biogás (válvula V12) en la parte superior del digestor se conectó a una trampa (sello) de agua y posteriormente a un contador de gas que permitió llevar un control diario de la producción de biogás.

²⁸ Especificaciones técnicas de los equipos: Ver anexo D.1. y C.3.

El siguiente diagrama muestra la estructura de cada módulo de digestión:

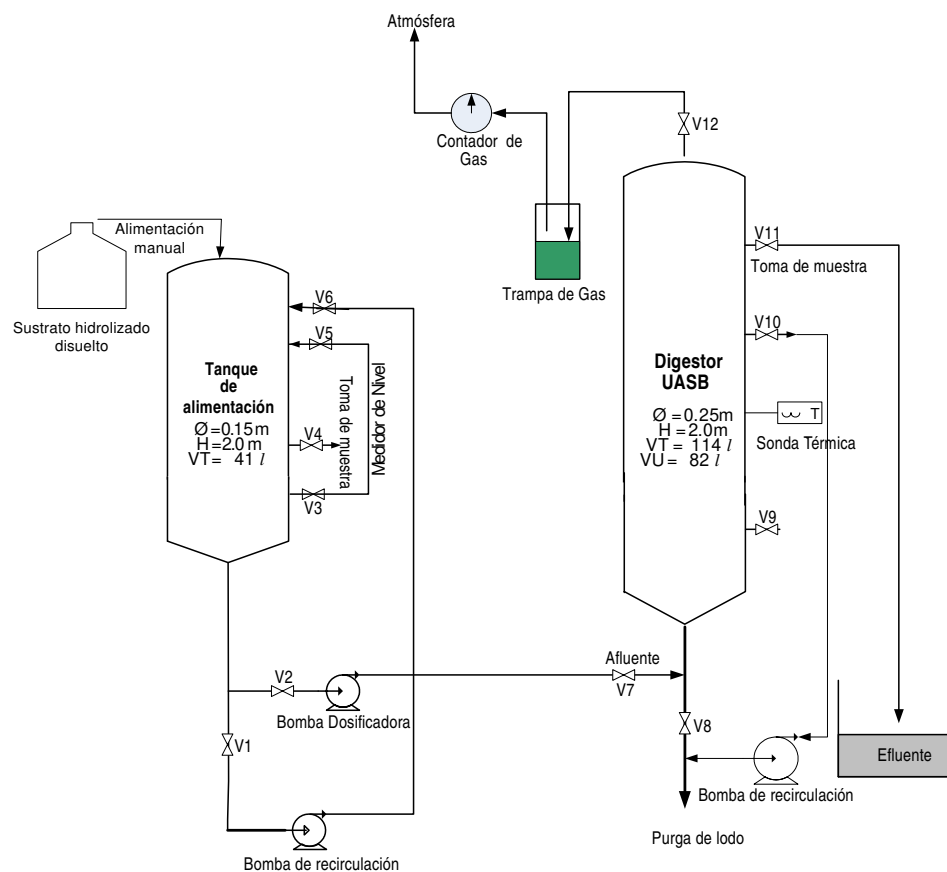


Figura No.11. Diagrama de las instalaciones para un módulo de digestión

Los puntos de muestreo se distribuyeron de la siguiente forma:

- 1.-. Sustrato hidrolizado disuelto antes de ser alimentado al tanque homogenizador.
- 2.-. Válvula V4 del Tanque alimentación.
- 3.-. Válvula V11 del Digestor.
- 4.-. Salida del contador de gas a la atmósfera.

La recolección de muestras en los puntos 2, 3 y 4, se realizó de forma manual con volúmenes de muestras entre 50 – 100 ml, en el caso de pruebas de campo como pH, factor de alcalinidad, producción y porcentaje de metano. Para las muestras que requerían de un procedimiento analítico con réplicas, se tomó un máximo de 500 ml. Dada la alta carga orgánica y de nitrógeno de las muestras, fue necesario determinar un factor de dilución para la realización de análisis relacionados con estos parámetros.

5.2.- Método

5.2.1- Preparación de los sustratos

Los sustratos a utilizar provienen del follaje del marango, compuesto por hojas y tallos no leñosos, el cual se sometió a prensado, utilizando una prensa de tornillo helicoidal, con el objetivo de extraer la mayor cantidad de líquido. Este se filtró dos veces, inicialmente utilizando una criba de acero inoxidable, con un diámetro de malla de 1 mm y luego al vacío, pasando por un tamiz con un diámetro de malla 0.5 mm. Esto se realizó para separar el material sólido de gran tamaño, fibra y proteína.

Para asegurar la continuidad del proceso, el líquido filtrado que no se utilizó en su momento, se almacenó en cubetas de 20 litros y a una temperatura de -16°C.

El sustrato floculado²⁹ (SF) se preparó sometiendo el líquido filtrado a calentamiento a una temperatura no mayor a los 60°C para flocular la mayor cantidad de proteínas, luego se llevó a cabo una filtración para eliminar los flóculos y parte de proteína que no se removió en la etapa de filtración. El sustrato no floculado (SNF) se preparó sometiendo directamente el líquido filtrado a hidrólisis.

Ambos sustratos (floculado y no floculado) fueron hidrolizados por un período mínimo de 48 horas; concluida esta etapa, se determinó la DQO en ambos casos y se asumió este valor como referencia para realizar las diluciones requeridas en función de la carga de alimentación. Después de la hidrólisis inicial fue necesario regular el pH de los sustratos usando NaOH al 50%.

²⁹Ver Glosario y fotos en anexo E.2.

5.2.2.- Caracterización de los sustratos

Para evaluar las características físicas y químicas de los sustratos, se realizaron los análisis siguientes:

Análisis	Sustrato ³⁰	Método o Equipo
Demanda Química de Oxígeno	SNF, SF, SHA, SHB, SDA, SDB	M.N. 5220 C.
Determinación de Nitrógeno Total	SNF, SF, SDA, SDB	DIN 38409-H11 (H28)
Sólidos Totales	SNF, SF	M.N. 2540B.
Sólidos Volátiles	SNF, SF	M.N.2540E.
pH	SDA, SDB, SNF, SF	pH metro

Tabla No. 3. Recopilación de los análisis realizados a los sustratos y los métodos utilizados.

5.3.-Arranque de los digestores

- **Inoculación**

El inóculo del digestor debe tener alguna actividad metanogenica. Cuanto mayor sea la actividad metanogenica, mas corto será el periodo de arranque. No debe llenarse con lodo más del 60%³¹ del volumen del digestor.

Una vez montado el sistema se procedió a llenar los digestores con agua hasta el nivel del efluente y posteriormente se alimentó con material proveniente del digestor PROINCASA (que trabaja con material proveniente de la matanza industrial de ganado vacuno). Se alimentaron en cada digestor aproximadamente 40 litros a un pH comprendido en el rango correcto de operación y se dejaron bajo reposo por un tiempo de 48 horas.

³⁰ Ver nomenclatura.

³¹ Arranque y operación de reactores UASB. Look Hulshoff

Durante el período de funcionamiento, los digestores se inocularon nuevamente, con el objetivo de mejorar el ritmo de producción. En el digestor A se realizó el décimo día con 20 l de material proveniente del digestor PROINCASA y luego el día 56 con 20 l de efluente proveniente del digestor CIPRES (que trabaja con estiércol de cerdo). En el digestor B se efectuó la misma medida el día 100, únicamente con material del digestor CIPRES, correspondiente 20 l.

- **Arranque**

Se inició el arranque en ambos digestores alimentando una carga volumétrica de 0.3 g DQO//d, por un período de 24 horas a un caudal de 11.1m//min, con un tiempo de retención relativamente constante de 5.1 días para evaluar el efecto del aumento de carga vía aumento de la concentración.

En el segundo ensayo del digestor A se utilizó inóculo producto de la mezcla del material proveniente de los digestores PROINCASA y CIPRES, alimentado una carga orgánica de 0.5 g DQO//d bajo régimen semicontinuo.

5.4.- Operación y control de los digestores

Los digestores fueron operados de manera continua hasta el día 91, utilizándose los parámetros pH y factor de alcalinidad como indicadores inmediatos de la estabilidad de los mismos. Se mantuvo el control de la temperatura regulando manualmente la sonda térmica y se llevo un control diario de la producción de biogás como un indicador más de estabilidad.

Se realizaron análisis diarios de DQO tanto de los sustratos como de la alimentación y efluentes de los digestores; los análisis de nitrógeno y sólidos fueron menos frecuentes tal como se muestra en la tabla No. 4.

Análisis	Muestra	Método o Equipo	Frecuencia	Réplicas por análisis	No. Análisis
DQO	SNF, SF, SHA, SHB, SDA, SDB, EA, EB	M.N. 5220 C.	diario	4	502
NT	SNF, SF, SDA, SDB	DIN 38409-H11 (H28)	2 x semana	3	35
NH ₃	EA, EB	Método DIN 38406 E5-2	2 x semana	3	30
Factor de alcalinidad	EA, EB	Titulación con HCL 0.25N	diario	1	364
SST	EA, EB	Métodos Normalizados 1992,2540D	semanal	3	24
SSV	EA, EB	Métodos Normalizados 2540E	semanal	3	24
ST	SNF, SF, Lodo Digestores: A, B, PROINCASA, CIPRES	Métodos Normalizados 1992,2540B	-	3	6
SV	SNF, SF, Lodo Digestores: A, B, PROINCASA, CIPRES	Métodos Normalizados 2540E	-	3	6
%CH ₄	Biogás	Reacción con NaOH	semanal	3	29
%H ₂ S ³²	Biogás	Equipo dräger	-	-	-
T°	EA, EB	Termómetro	diario	3	364
pH	Afluente A, Afluente B, EA, EB	pH metro	diario	5	356

Tabla No. 4. Parámetros físico-químicos de control.

³² Análisis realizados únicamente en períodos de inestabilidad, que reducen notablemente la producción de biogás.

5.5.- Problemas de operación

Los resultados de esta investigación fueron obtenidos mediante la modificación de las condiciones iniciales de operación, ya que en un principio se pretendía trabajar en régimen continuo. Posteriormente se ajustó a las condiciones locales existentes, debido a la influencia que estas tuvieron. Las mismas se detallan a continuación:

- **Energía:**

Los continuos y prolongados racionamientos energéticos obligaron a modificar el régimen de operación del sistema, cambiándose a semicontinuo. Inicialmente se alimentó en un período de 8 horas, pero luego se redujo a 6 horas. En ciertas ocasiones se alimentó a velocidades mayores para aprovechar los períodos cortos con energía.

La variaciones repentinas en la corriente eléctrica, sumado a los apagones, provocó el desajuste de los equipos, teniendo que recalibrarlos constantemente y en ciertos casos se tuvieron que reparar o cambiarlos definitivamente.

- **Agua potable:**

Los prolongados y diarios cortes de agua potable imposibilitaron ciertas pruebas de laboratorio, debido a que determinados equipos requerían de ésta para operar y poder garantizar la sistematicidad de las mismas.

- **Otros:**

Atascamiento de las bombas.

Ruptura de mangueras de recirculación de los tanques de alimentación.

Escasez de sustratos A y B.

Explosión del transformador que abastece la línea primaria 220 y 110 V.

VI.- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1.- Caracterización del sustrato

La siguiente tabla presenta los resultados de los análisis que se realizaron a los sustratos en los ensayos antes de ser sometidos al proceso de hidrólisis.

Parámetro	Sustrato no Floculado (Digestor A)	Sustrato Floculado (Digestor B)
DQO	104.57 g/l	53.05 g/l
pH	4 – 6	4 – 5
Nitrógeno total (NT)	1.12 g/l	0.50 g/l
ST	48.23 g/l	24.77 g/l
SV	37.27 g/l	18.56 g/l

Tabla No.5. Características fisicoquímicas promedios de los sustrato A y B.

En la preparación del sustrato floculado (digestor B), la concentración de la DQO se vio reducida cerca de un 50% con respecto al sustrato no floculado, ya que en este proceso se eliminaba proteína y fibra a través de la floculación.

Ambos sustratos se sometieron a hidrólisis durante 48 horas, proceso durante el cual se tomaron muestras puntuales cada 24 horas, a los que se le realizó análisis de DQO. Con respecto a este resultado se calculó el promedio de la DQO de los sustratos floculado y no floculado.

Fresco		24Hrs. de hidrólisis		48 Hrs. de hidrólisis	
SNF (gDQO/l)	SF (gDQO/l)	SHA (gDQO/l)	SHB (gDQO/l)	SHA (gDQO/l)	SHB (gDQO/l)
72.4	45.9	46.9	37.42	-	-
130.2	60.7	121.14	53.44	94.55	49.44
89.6	48.5	71.6	27	63.56	24.2
89.3	53.6	79.64	30.6	65.5	24.5

Tabla No.6. Comportamiento de la DQO con respecto al tiempo de hidrólisis.

Los resultados mostrados en la tabla No. 7 reflejan una disminución de la DQO en el sustrato no floculado aproximadamente de 25% en promedio, mientras que en el sustrato floculado se aproximó al 40%. Esto se atribuye a que el proceso de floculación facilitó a que las bacterias hidrolíticas y acidogénicas consumieran el material orgánico, libre de compuestos de difícil degradación. Esto representa una desventaja desde el punto de vista de este estudio, ya que se pierde mucho material orgánico útil para la generación de biogás.

6.2.- Esquema de carga aplicada

Se efectuaron los incrementos de la carga, vía aumento de la concentración de DQO en los afluentes.

- **Digestor A**

La variación de la carga orgánica volumétrica aplicada en el digestor A se presenta en la figura No. 12.

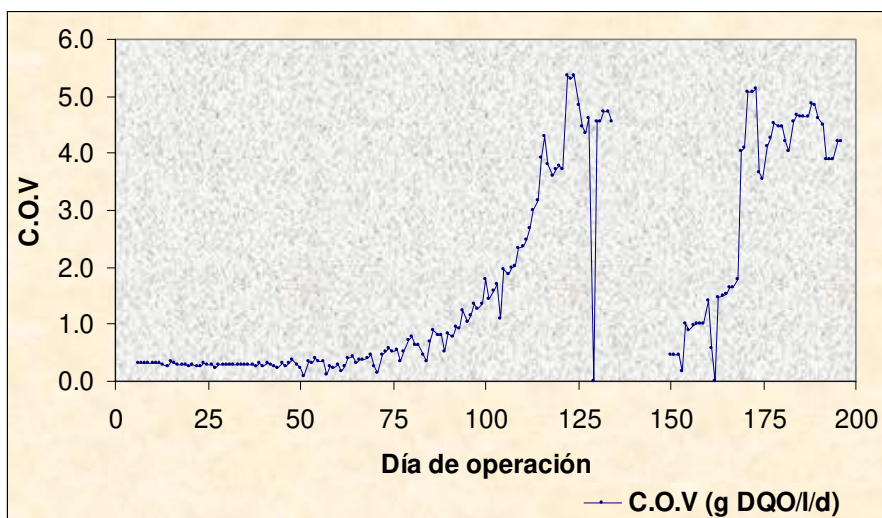


Figura No.12. Esquema de carga. Digestor A (Sustrato no floculado).

Inicialmente se alimentó una carga orgánica de 0.3 g DQO//d. Se efectuó un primer aumento del 10%, el día 59 de operación, debido a que el factor de alcalinidad mostraba tendencia hacia la estabilidad (ver figura No. 16); este cambio originó incremento de esta variable en días posteriores, pero se decidió mantener esta última esperando una adaptación de las bacterias del nuevo inóculo (lodo del CIPRES) que se introdujo el día 56.

A partir del día 82 se continuó incrementando la carga en un 20% de acuerdo con la respuesta del reactor. Aumentos posteriores a una carga mayor a 3 g DQO//d provocaron que el sistema recuperara la estabilidad a más largo plazo, procediendo a variar los incrementos en 0.5 g DQO a partir del día 110.

El tiempo de arranque fue bastante prolongado, casi de 80 días, operando a cargas bajas, esto debido al comportamiento inestable del factor de alcalinidad, que tiene su origen la lenta adaptación del inóculo (poca población bacteriana, la cual se reproduce y se adapta al sustrato³³). Una vez creado el ambiente propicio en la biomasa, el comportamiento en el factor de alcalinidad mejoró permitiendo realizar incrementos en la carga, alcanzando una carga de 5.37 g DQO//d. Debido a este cambio se observó tendencia de aumento en el factor alcalinidad, la acción a emprender fue de disminuir carga paulatinamente.

En este período se realizaban paralelamente pruebas en busca de fugas de gas en los digestores; accidentalmente se dejaron cerradas las válvulas en este digestor, esto ocasionó un aumento de presión dentro del digestor de tal manera que provocó el derrame del líquido (día 129) por la válvula de recirculación (ver figura No. 10).

³³ Arranque y Operación de Reactores UASB. L. Hulshoff.

Se adoptaron medidas que evitaran la acidificación total del sistema, tales como: disminuir carga en 0.5 g DQO//d, inocular nuevamente con lodo del CIPRES y aumentar el pH del afluente. Aún con todo esto, el comportamiento fue de inestabilidad en los parámetros de control; al no poder recuperar el sistema, se decidió parar completamente el ensayo (eliminó todo su contenido) y se arrancó nuevamente.

El segundo ensayo inició el día 150 de la etapa experimental con una carga de 0.5 g DQO//d. Por la experiencia del ensayo anterior, se decidió utilizar un inóculo de mejor adaptabilidad, el cual consistió en la mezcla de lodo proveniente de los digestores PROINCASA y CIPRES.

Este ensayo se ejecutó en un tiempo menor, a como se observa en la figura No.12 con un período corto de arranque e incrementos más agresivos en la carga. La estabilidad de este ensayo, igual que en el anterior, se vio amenazada en todo el período de funcionamiento por los cortes de energía.

En un período más corto se alcanzó una carga de 5.14 g DQO//d, sin que los parámetros de control mostraran indicios de inestabilidad (ver figura No.16) lo cual permite afirmar que el digestor tenía la capacidad buffer suficiente para tolerar aumentos de cargas más frecuentes y arrancar y estabilizarse en un período de un mes.

Una avería de la termocupla originó incrementos en la temperatura alcanzando los 46°C (ver figura No. 30), deteriorando la estabilidad del digestor, a lo cual se suman las velocidades altas de alimentación³⁴ realizadas en ciertos momentos para garantizar la carga. Las acciones emprendidas para reestablecer las condiciones de estabilidad fueron: regulación del pH y disminución de la carga. Sin embargo, la problemática energética afectó en gran medida el desarrollo del ensayo; esto no dio lugar a que las medidas tomadas hicieran efecto, por lo que se decidió culminar este ensayo el día 195.

³⁴ Soto, et all.

- **Digestor B**

Se inició con una carga de 0.3 g DQO//d y se observó el mismo comportamiento del digestor A en relación a la ejecución de los incrementos de carga. El arranque también fue lento (ver figuras No. 13), atribuido a la utilización del mismo tipo de inóculo (poca actividad metanogénica) utilizado en ambos digestores.

Se observó que la biomasa del digestor, al pasar de un régimen continuo a uno semicontinuo (obligado por el racionamiento energético), asimiló mejor el cambio en las velocidades de alimentación, pues el desequilibrio de los parámetros de control es temporal.

Después de alcanzar una carga de 6.48 g DQO//d de operación, el digestor presentó irregularidades en la estabilidad, reflejadas en una baja remoción de la DQO y aumento progresivo del factor de alcalinidad por encima de 0.4 (ver figuras No. 17 y 19).

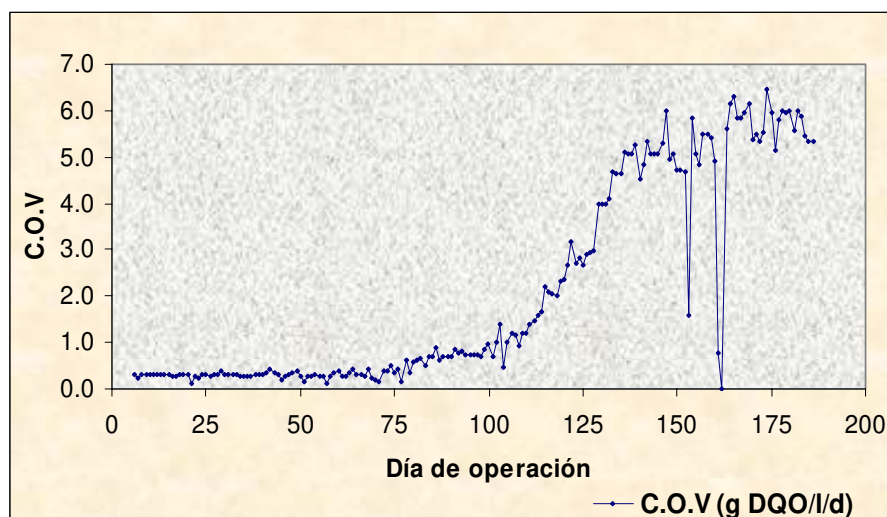


Figura No.13. Esquema de carga. Digestor B (Sustrato floculado).

El efecto de alimentar a velocidades altas originó inestabilidad, sin que se llegara al punto de acidificación ya que el digestor poseía la capacidad buffer para soportar estos cambios; sin embargo, la continua exposición a esta, produjo un continuo aumento en el factor de alcalinidad.

Para reestablecer la estabilidad se disminuyó paulatinamente hasta una carga de 5.34 g DQO//d, sin obtener ningún efecto positivo. Los racionamientos de energía, provocaron interrupciones en la alimentación e impidieron garantizar la estabilidad del proceso, por lo que se decidió culminar este ensayo el día 186.

6.3.- Comportamiento del pH

- **Digestor A**

El pH del sustrato no floculado se mantuvo en un rango ácido (4 – 6) lo cual implicó la necesidad de neutralizar el afluente, antes de ser alimentado al reactor, utilizando NaOH. Esto se hizo más frecuente durante todo el período de alimentación a cargas mayores a 3 g DQO//d. Se puede observar en la figura No.14 que la mayoría de mediciones de pH en el afluente oscilaron entre 6.5 – 7.

Los datos registrados de pH del efluente durante el período de arranque se mantuvo en el rango de 6.7 – 7.2. Posteriormente se observó una caída gradual del pH, lo que se atribuyó a la insuficiente capacidad buffer del digestor, ya que permitía una paulatina acumulación de AGV no disociados³⁵. Se tomaron las medidas pertinentes para recuperar la estabilidad, pero el derrame inesperado del contenido del reactor acentuó el desequilibrio de manera grave, lo cual dificultó su corrección.

³⁵ Soto, et al.

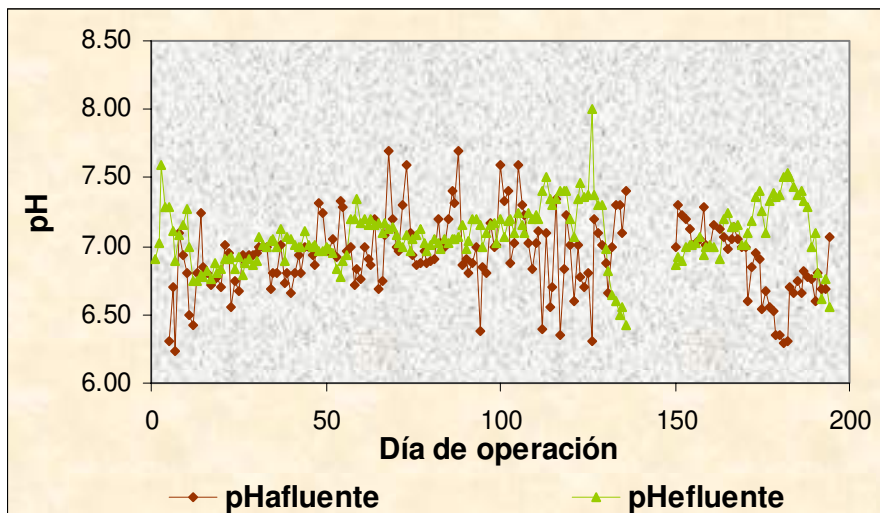


Figura No.14. Comportamiento del pH en el Digestor A.

En el segundo ensayo se ajustó nuevamente el pH del afluente tratando esta vez de suspender la adición de NaOH, reduciendo gradualmente el pH del afluente a partir del día 171. Esto no afectó el desempeño del digestor, ya que el comportamiento del pH del efluente se mantuvo en el orden de 7.3 (ver figura No.14).

El efecto de alimentar a velocidades altas contribuyó a una sobrecarga en el digestor (acumulando AGV no disociados nocivos para la biomasa: ácido acético, ácido propiónico y butírico)³⁶, unido al desperfecto del dispositivo de control de la temperatura, ocasionaron desestabilización del sistema, observado en los datos del pH efluente a partir del día 192. Se decidió detener operaciones el día 196, por la falta de sustrato y constantes cortes energéticos.

³⁶ Relación alcalinidad-Ácidos Grasos. O. Rojas. 1987.

- **Digestor B**

El sustrato floculado presentó mayor acidez (4 – 5), lo que hizo necesario ajustar el pH del afluente para mantenerlo estable en el período de alimentación. La cantidad de neutralizante utilizada para la corrección del pH para este sustrato fue mayor, pero la frecuencia de mediciones fue menor en comparación al digestor A. La cantidad usada de NaOH dependía de la carga orgánica a alimentar.

Por otra parte el pH del efluente se mantuvo por el orden de 7 unidades hasta el día 101, seguidamente se notó un crecimiento gradual del mismo, facilitado por la continua adición de NaOH al afluente y operando con cargas mayores de 4 g DQO//d, llegando a valores próximos a 7.4 (ver figura No.15).

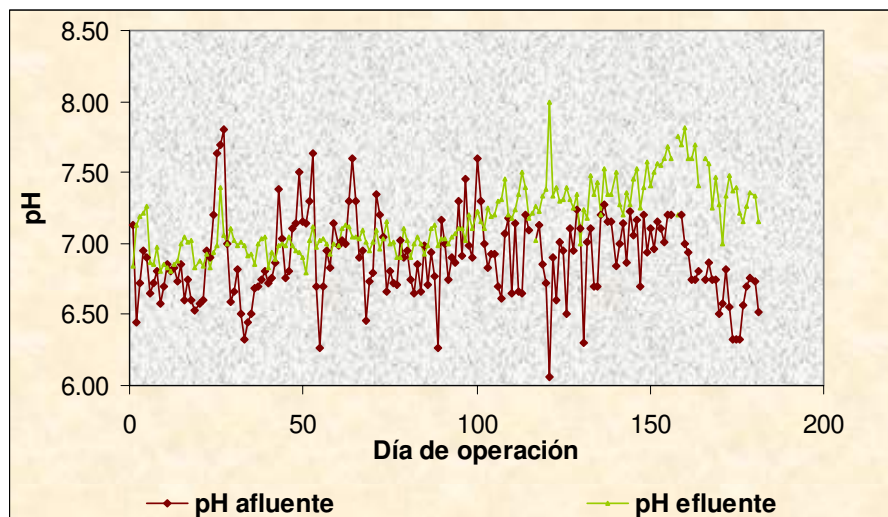


Figura No.15. Comportamiento del pH en el Digestor B.

Se observó un incremento en el pH del efluente hasta 7.8 atribuido a la absorción del CO_2 en la fase líquida para formar bicarbonatos. Esto se observó para el período comprendido entre los días 154 – 172. Para corregir este comportamiento, se redujo paulatinamente la adición de NaOH en el afluente a partir del día 165, con el objetivo de evitar que se alcanzaran valores mayores a 8 que causarían inhibición de la actividad de las bacterias metanogénicas.

6.4.- Factor de alcalinidad

Los valores de alcalinidad permiten determinar la estabilidad de los digestores con respecto a la degradación de ácidos grasos volátiles; valores por encima de 0.4 indican inestabilidad en el digestor y un factor de alcalinidad por el orden de 0.3^{37} manifiesta que el sistema posee una buena capacidad buffer (proporcionada por el ión HCO_3^-) y tolerar cambios de carga orgánica.

- **Digestor A**

De acuerdo a los datos obtenidos, se puede afirmar que en este sistema se alcanzó estabilidad después de 80 días, definiéndola como la etapa de arranque (ver figura No. 16). Para reducir esta etapa (la cual se reflejó en la estabilidad) se procedió a inocular nuevamente, sin embargo se vio alterada por la suspensión de la alimentación por falta de fluido eléctrico en el arranque y resto del proceso.

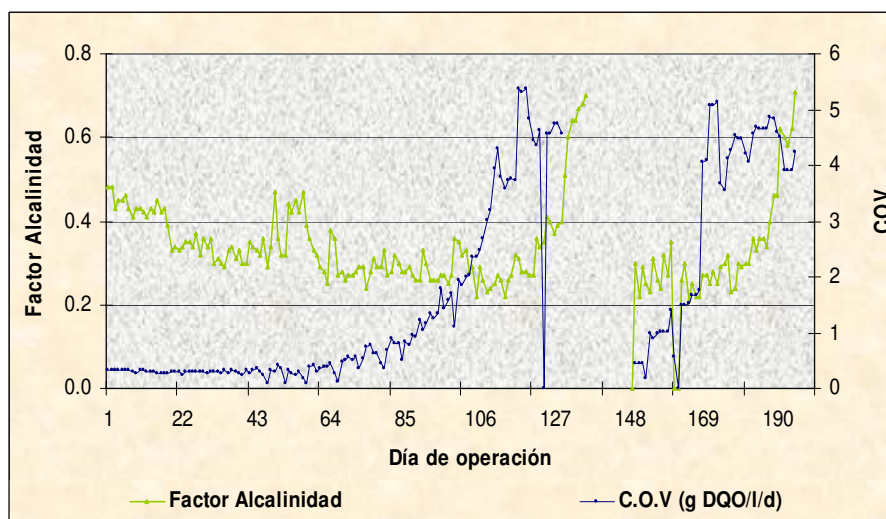


Figura No.16. Comportamiento de Alcalinidad en digestor A en función de la carga.

³⁷ Dra. Gabriele Foidl (comunicación personal).

El aumento en el factor de alcalinidad se observó a partir del día 122, con un valor de 0.36; la medida inmediata fue disminuir carga para garantizar la no acidificación, pero el derrame del contenido del digestor condujo a la suspensión de la operación del mismo, por los altos valores del factor de alcalinidad, hasta de 0.7, lo cual indicó la acumulación de AGV en el digestor.

El segundo ensayo mostró un arranque rápido conseguido por el tipo de inóculo cuya adaptación al sustrato fue rápida, el 82% de los valores se encontraron por debajo de 0.4, valor máximo permisible, circunstancia muy distinta al ensayo anterior, cuyo tiempo de adaptación fue muy largo dado por la dificultad de estabilizar el factor alcalinidad.

Valores por encima de 0.4 se presentaron a partir del día 183 (carga 4.57 g DQO//d), producto de los ocasionales aumentos en la velocidad de alimentación e incrementos de temperatura. Todo indicó que se estaba llevando a cabo un proceso de descontrol que trató de corregirse ajustando el pH y disminuyendo la COV, pero las condiciones de trabajo sumado al desajuste de la termocupla no permitieron un efectivo control. Ya para el día 195 se obtuvo un valor de 0.71, lo cual reveló que la capacidad buffer se agotó, el digestor se acidificó y se decidió detener el sistema ese mismo día.

- **Digestor B**

Las fluctuaciones del factor de alcalinidad, durante el período de arranque (54% de las mediciones), fueron resultado de la lenta adaptación del inóculo utilizado por lo que se hizo necesario volver a inocular.

El nuevo inóculo utilizado incrementó la capacidad buffer del digestor, obteniendo valores entre 0.3 – 0.25, correspondiente al 39% del tiempo de ensayo que permitió un mejor funcionamiento, verificado por la resistencia a los cambios de carga, que podían traer consigo la acumulación de AGV y variaciones de pH, que solían ocurrir en períodos de inestabilidad.

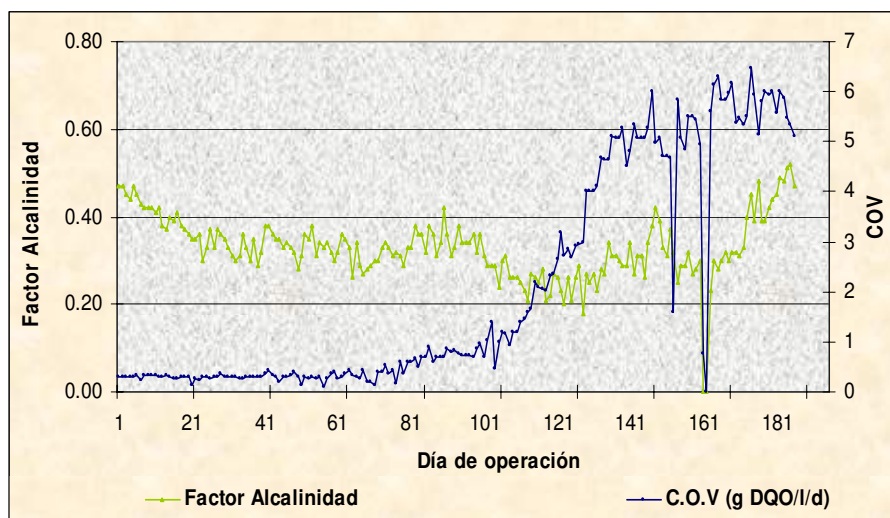


Figura No.17. Comportamiento de factor alcalinidad en digestor B en función de la carga

Se observó que a partir de cargas próximas a 6 g DQO//d, cualquier modificación en las condiciones de operación perturbó la estabilidad del digestor reflejado en el aumento gradual del factor alcalinidad a partir del día 173 hasta alcanzar un valor de 0.47. En esta condición el digestor aún podía ser recuperado, pero era un período prolongado y los factores externos no permitían desarrollar dicho proceso de restauración.

6.5.- Remoción de DQO

El porcentaje de remoción de la DQO se estimó como la diferencia de la DQO_{afluente} y DQO_{efluente} de cada digestor dividida por la DQO_{afluente} . Generalmente es más significativo medir la DQO del efluente filtrado, ya que el porcentaje de remoción de la DQO filtrada es la remoción de la DQO soluble que se convertirá a metano.

Durante el ensayo se efectuaron determinaciones de DQO de muestras de efluente filtrado y sin filtrar, sin embargo en base a lo anterior se utiliza la DQO filtrada para determinar el porcentaje de remoción.

- **Digestor A**

Se obtuvieron porcentajes de remoción de la DQO entre el 14 – 60% en el período de arranque. A partir del día 61, los porcentajes de remoción estuvieron por el orden del $90\% \pm 5\%$, mantenidos hasta el día 122, cuando se dio la desestabilización y suspensión de la operación por los motivos expuesto en el acápite 6.2.

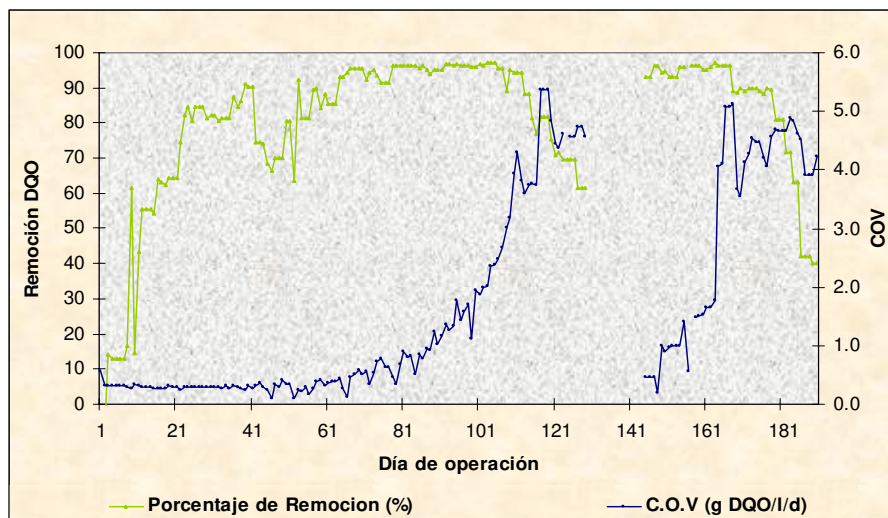


Figura No.18. Porcentaje de remoción DQO en relación a COV del digestor A.

En el segundo ensayo, la remoción fue mayor del 90% desde el inicio, hecho atribuido a la adaptación del inóculo. Esta remoción se mantuvo hasta que el brusco aumento de carga en los días 168 – 171 (de 1.78 hasta de 5.07 g DQO//d) provocaron un descenso llegando a valores próximos al 80%; posteriormente la remoción disminuyó gradualmente hasta valores del 40%, debido a la inestabilidad, esta vez causado por efectos térmicos y altas velocidades alimentación de carga orgánica.

Las condiciones adversas bajo las cuales se realizó el ensayo no permitieron comprobar si el efecto del descenso en la remoción provocado por el aumento brusco de la carga era permanente o temporal, pues existía la probabilidad de que el digestor recuperara la eficiencia de remoción una vez superado el efecto inicial de dicho aumento y operar establemente a las cargas mencionadas.

La eficiencia de remoción en el digestor A se esperaba que fuese menor que la remoción en el digestor B por el alto contenido de material orgánico; sin embargo los resultados reflejaron que había una buena remoción, pero este material no necesariamente se degradaba (lenta degradación) sino que se retuvo dentro del reactor, por tanto, la eficiencia del digestor se debe confirmar con la productividad y el rendimiento.

- **Digestor B**

Los resultados de la remoción mostrados en la figura No. 19 reflejan poca uniformidad en todo el período de arranque, la mayoría de datos estuvieron entre un rango de 70 – 85% de remoción, a cargas cercanas a 1.5 g DQO//d.

El comportamiento estable del factor de alcalinidad (ver figura 17) permitió una mejor remoción de la DQO hasta del 90%. A partir de cargas de 5 g DQO//d, la eficiencia de remoción inició a decrecer hasta el intervalo de 60 – 70% y fue en la carga 6.5 g DQO//d cuando solamente se removió el 50%.

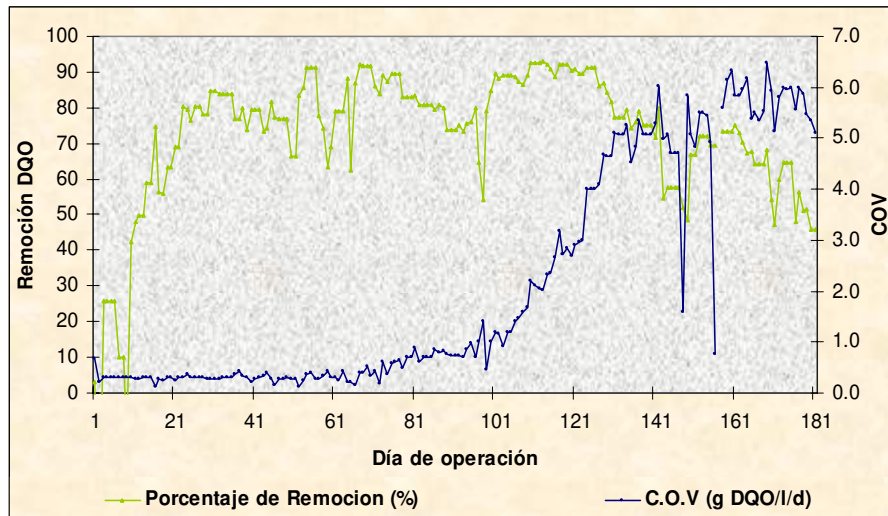


Figura No.19. Porcentaje de remoción DQO en relación a COV del digestor B.

Comparando la eficiencia de remoción de los ensayos efectuados en el digestor A con respecto al digestor B, se pudo apreciar que a cargas próximas a 5 g DQO/l/d, este parámetro disminuye, cayendo también la producción de gas por unidad de volumen de sustrato degradado (ver figura No. 20 y 21); posiblemente sea este valor de carga a la que los digestores trabajan más eficientemente.

6.6.- Producción y Calidad del Biogás

El registro de la producción de biogás en los digestores A y B se realizó diariamente. El contenido de metano se midió, hasta que la cantidad producida permitió tomar el volumen de muestra requerido para efectuar dicha determinación.

La producción de biogás fue por el orden de 10 l/d por un tiempo de 82 días, en ambos digestores, atribuido a la adaptación de las bacterias metanogénicas al sustrato. Sin embargo, se realizaron pruebas para detectar fugas; en las válvulas del digestor, en la trampa de gas y contador comprobándose la existencia de éstas y se procedió a sellar herméticamente cada uno de estos accesorios y evitar así que se continuara escapando el biogás.

- **Digestor A**

La figura No. 20 muestra el volumen de biogás producido con respecto al valor teórico esperado, apreciando una diferencia marcada entre la producción real y la teórica a cargas mayores de 2 g DQO//d, aun cuando se obtuvieron altos valores de remoción (ver figura No. 18) y es que parte de la DQO alimentada compuesta de material proteico era retenido por la biomasa del digestor y solamente la parte fácilmente de degradar era convertido a biogás. La producción real se alejó más de la teórica en período de inestabilidad a carga mayores de 5 g DQO//d.

En el primer ensayo, la producción alcanzó como máximo 108.2 l para el día 115 con una carga de 3.93 g DQO//d. Esta fue superada en el segundo período de operación, generando 139 l para el día 173 con una carga de 5.07 g DQO//d.

En el segundo ensayo, la producción real fue mayor que en el primer ensayo, lo cual significa que el inóculo utilizado contó con la población bacteriana capaz de degradar el material proteico contenido en el sustrato.

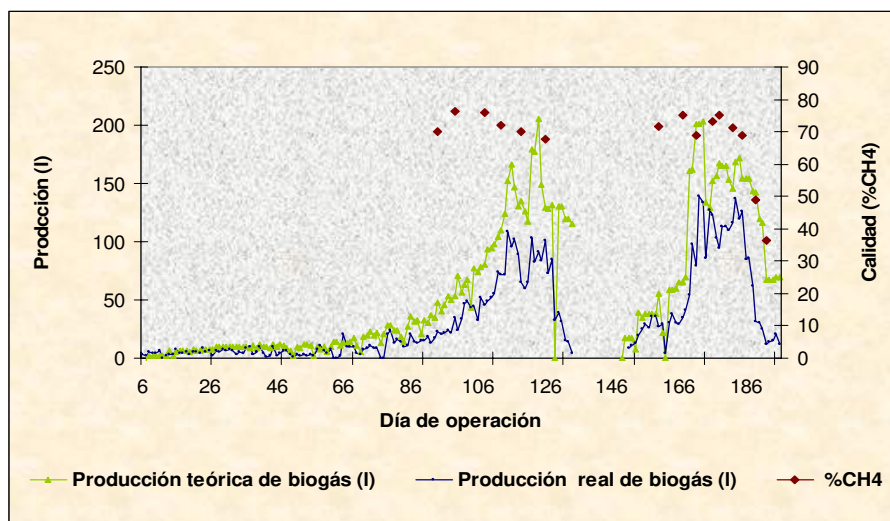


Figura No.20. Producción y calidad de biogás. Digestor A.

En el primer período de funcionamiento, la calidad fue buena, dado que se determinó un contenido de metano superior al 70%, a partir de cargas de 1.23 g DQO//d. En el segundo ensayo la calidad estuvo por el mismo orden con la diferencia que la producción de biogás fue mayor.

En general se observó que la disminución en la producción de gas se produjo por tres incidentes:

En primer lugar, los incrementos bruscos en la carga (principalmente a cargas superiores a 4 g DQO//d), que a su vez generó períodos cortos de inestabilidad; su efecto puede ser inmediato o derivarse en días posteriores.

La interrupción de la alimentación por falta de energía eléctrica ocasionó una ligera disminución en la producción de biogás, sin embargo no se detuvo por el efecto de acumulación de DQO dentro del digestor.

Por último, en períodos muy críticos la reducción en la producción del biogás fue causada por las altas velocidades de alimentación, falta de agitación debido a los cortes energéticos e incrementos de temperatura.

En períodos muy críticos del segundo ensayo se midió el porcentaje de H_2S en el biogás, para determinar el carácter inhibitor dentro del digestor. Para el periodo de operación entre los días 186 – 195 se presenta la oportunidad para medir el contenido de gas sulfhídrico en el biogás. Se encontró 1.5% en volumen de H_2S ; lo que indica inhibición de la actividad metanogénica del lodo; en caso de un pH bajo (por el orden de 6.8, ver figura No.14) se aumenta el contenido de H_2S .

- **Digestor B**

La relación entre el volumen producido de biogás real y el teórico se puede ver en la figura No. 21. En el período de arranque este comportamiento se corresponde. Operando a cargas mayores de 3 g DQO//d se observó una buena aproximación a la producción teórica, esto indicó que la conversión de la DQO a biogás fue mayor, en comparación con el digestor A, demostrando mejor desempeño.

Se observó que la producción real era superior a la teórica en varias ocasiones, esto se explica por el efecto de la DQO acumulada en el digestor; a pesar que se suspendió la alimentación, las bacterias no cesaron su actividad metanogénica. Estas continuas interrupciones afectaron la estabilidad del digestor, disminuyendo la remoción (ver figura No. 19) y consecuentemente la producción de biogás, que difiere de la teórica.

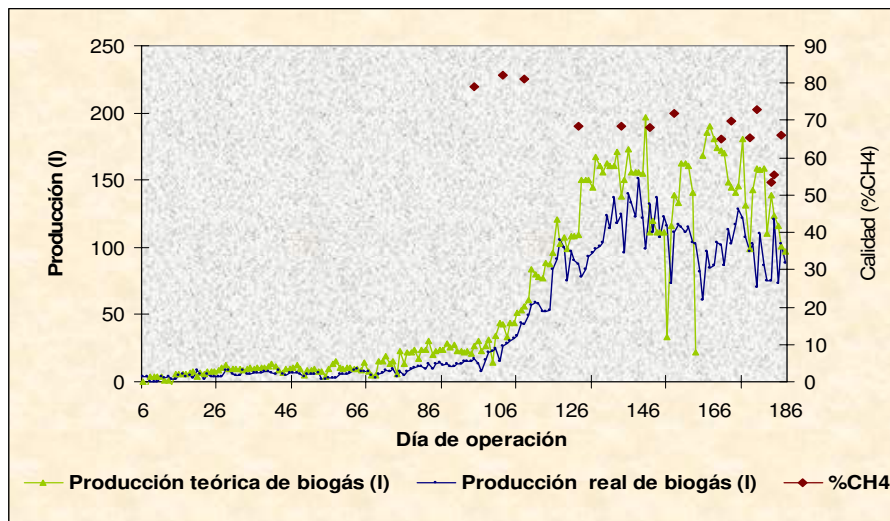


Figura No.21. Producción y calidad de biogás. Digestor B.

La máxima producción de biogás llegó a 151.2 l, para el día 145 operando con una carga de 5.28 g DQO//d y el mas alto porcentaje de metano medido correspondió a 82% a una carga de 1.17 g DQO//d, el cual se redujo al 70% en promedio con el incremento de la carga a partir de 3 g DQO//d. La producción de biogás en períodos de estabilidad fue mayor a 80 l operando a una carga de 2.66 g DQO//d.

En el período de inestabilidad comprendido entre los días 172 – 186, se midió el contenido de gas sulfhídrico el cual fue 1.75% en volumen. Existió la posibilidad de formación de H₂S libre, pero el comportamiento del pH no lo favoreció.

6.7.-Productividad

- **Digestor A**

Durante el período de arranque, se notó un comportamiento relativamente constante de baja producción generado por la alimentación de cargas bajas. A partir de 1 g DQO//d, esta variable inició a aumentar hasta alcanzar un máximo de 0.95 l/biogás//digestor con una carga de 3.93 g DQO//d; cargas aplicadas alrededor de está, presentaron valores aceptables de productividad. La productividad del digestor comenzó a descender hasta caer completamente por problemas que condujeron al fin de la primera fase del ensayo.

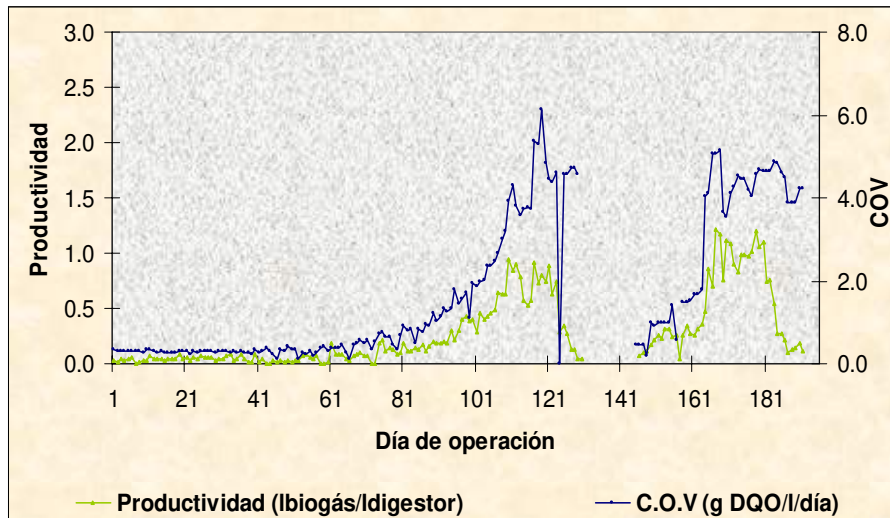


Figura No.22. Productividad en función de la carga orgánica. Digestor A.

En la segunda fase del ensayo, se observó un rápido aumento de la productividad en concordancia con el incremento de la carga, obteniéndose en un valor máximo de 1.22 lbiogás/digestor, con una carga de 5.07 g DQO//d. Este resultado es congruente en relación a datos reportados en otros ensayos (1.1 – 2 lbiogás/digestor a cargas entre 2.89 – 5 g DQO/ //d) que han operado con digestores UASB³⁸. El descenso que se observó en la Figura No.22 (a partir del día 180), fue a causa de los problemas operacionales.

Al comparar los resultados de productividad en los ensayos realizados, se puede ver que a cargas aplicadas por orden de 3.5 – 5 g DQO//d los valores de productividad son bastante buenos.

³⁸ J. García, 1993, S. Gonzáles, 1997.

- **Digestor B**

De igual manera, se observó la misma tendencia durante el período de arranque. Se alcanzó un valor máximo de 1.33 l/biogás/l/digestor, con una carga de 5.07 g DQO/l/d; próximas 6 g DQO/l/d provocaron la caída de la productividad por problemas operacionales. Los mejores resultados de productividad se observan a cargas entre 4.5- 5.7 g DQO/l/d.

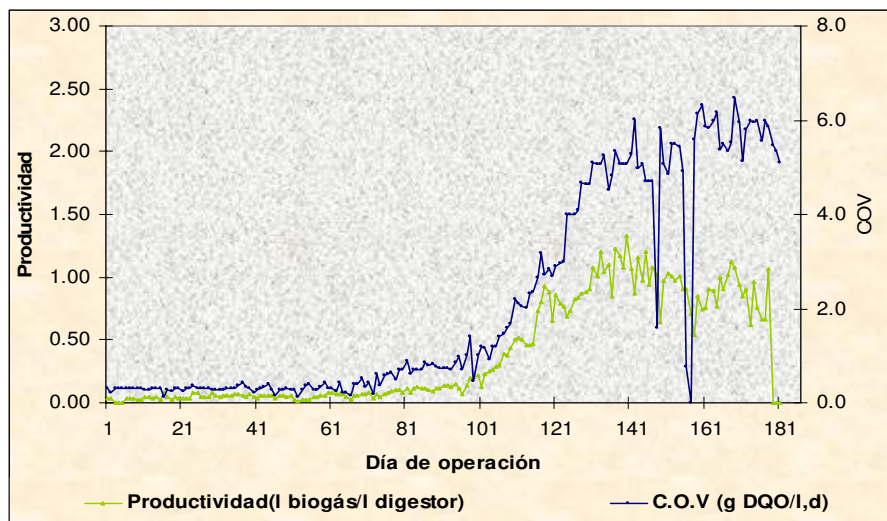


Figura No.23. Productividad en función de la carga orgánica. Digestor B.

Se observó que el comportamiento de la productividad durante el segundo ensayo del digestor A, fue similar a la del digestor B a un determinado nivel de carga (mayor de 4.5 g DQO/l/d), a pesar de que se utilizaron sustratos distintos (extracto floculado y no floculado). La mayor productividad obtenida fue en el digestor B, debido a las características del sustrato, ya que al eliminar cerca del 50% del material complejo, dio lugar a un alto grado de degradación por parte de las bacterias, reflejado en una buena producción. La similitud que mostró el digestor A, se debió al nuevo inóculo.

6.8.-Rendimiento

Generalmente, el rendimiento de un digestor se evalúa en función de la producción de metano y la DQO degradada (removida) a medida que el proceso de fermentación avanza y la producción aumenta con el incremento de carga, pero en un momento estos aumentos inciden negativamente en la estabilidad del digestor (sobrecarga) y por ende la producción.

El volumen máximo de conversión teórica³⁹ para metano, corregido a una temperatura de 25°C y 1 atmósfera de presión, corresponde a 0.395 l CH₄/g DQO_{removido}. El valor mayormente reportado en otros estudios y en la práctica es de 0.35 l CH₄/g DQO_{removido}.

- **Digestor A**

El rendimiento promedio en el primer ensayo fue de 0.21 l CH₄/g DQO_{removido}. El valor más alto obtenido fue de 0.36 l CH₄/g DQO_{removido} correspondiente a una carga de 1.11 g DQO//d, pero con una productividad baja. Los datos mas cercanos al rendimiento teórico se corresponden con valores altos de productividad (ver anexo A.3) operando a cargas mayores de 3 g DQO//d, esto se debe a que la productividad aumenta con el incremento de la carga.

³⁹ Jim Field. 1987.

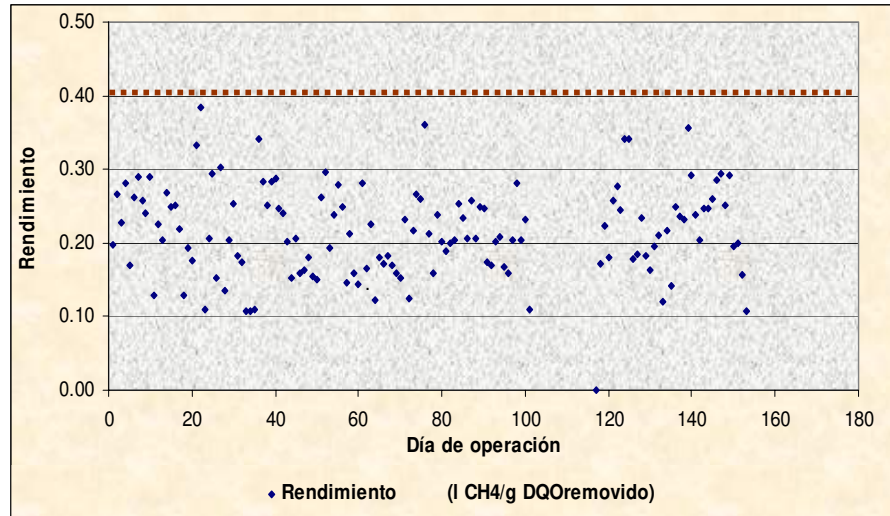


Figura No.24. Rendimiento del digestor A en función de la carga.

En el segundo ensayo el valor promedio fue de 0.23 l CH₄/g DQO_{removido} realizado en un tiempo más corto. En este ensayo hubo mayor una población mayor de datos que se acercan al teórico, observado a carga mayores de 3.5 g DQO//d en la cual también se observó períodos de productividad máxima. A una carga de 3.54 g DQO//d se obtuvo el más alto rendimiento de 0.36 l CH₄/g DQO_{removido}.

- **Digestor B**

El rendimiento promedio del ensayo correspondió a 0.23 l CH₄/g DQO_{removido}. De manera general se presentó un incremento paulatino del rendimiento con el aumento de carga llegando a alcanzar un valor de 0.34 l CH₄/g DQO_{removido} a una carga de 5.07 g DQO//d que luego tiende a disminuir con el gradual aumento de esta.

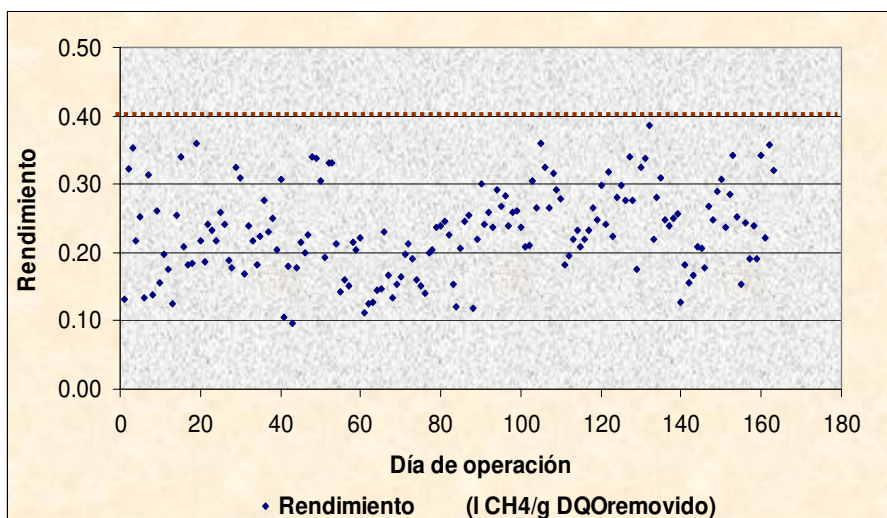


Figura No.25. Rendimiento del digestor B en función de la carga.

En general los rendimientos máximos obtenidos en ambos ensayos se corresponden con períodos de productividad alta, aún cuando estos resultados de rendimiento son variables.

6.9.-Comportamiento del Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes principales para el crecimiento de la materia celular. Una eficiente actividad de las bacterias, requiere teóricamente una relación mínima de nutrientes DQO:N de 350:7. Para determinar si los sustratos a utilizar contienen la cantidad demandada es necesario conocer la concentración de DQO y cantidad de nutrientes (ver Anexo A.4 y B.4). Se encontró que al inicio del arranque a una COV de 0.3 g DQO/l/d, la relación fue de 350:14 y 350:10 para el digestor A y B respectivamente, como se esperaba los sustratos no carecían de nitrógeno.

Durante la digestión el nitrógeno total (orgánico) es degradado y liberado en forma inorgánico (NH_3) y un pequeño porcentaje es utilizado en la producción celular⁴⁰, por tanto parte del nitrógeno total en el afluente debe estar presente en el efluente como nitrógeno inorgánico.

- **Digestor A**

La figura No. 26 muestra que en el período de arranque parte del nitrógeno total era transformado a NH_3 y muy poco crecimiento celular, alguna porción salió sin transformar. Posteriormente, con la adaptación del sustrato y los cambios de carga, los requerimientos de nutrientes son mayores para el crecimiento bacteriano, alejándose la línea de concentración de nitrógeno total de la línea de concentración amoniacal.

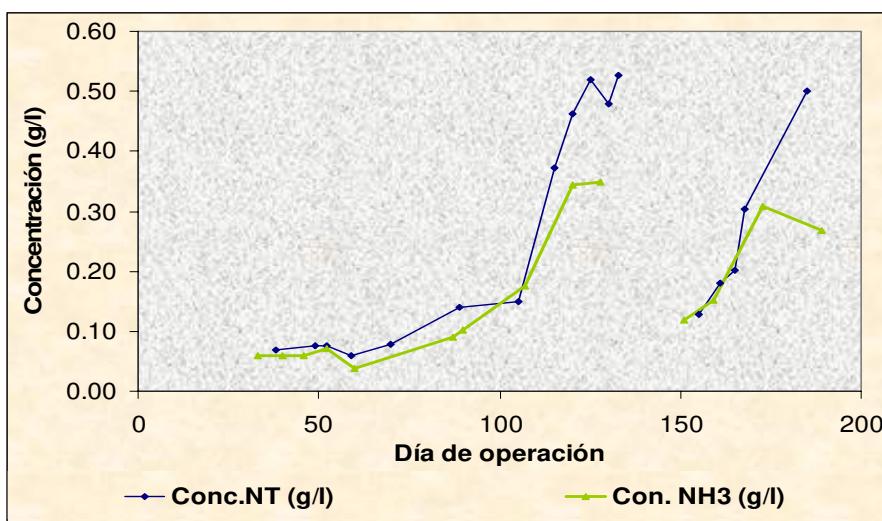


Figura No.26. Nitrógeno total vs. Nitrógeno amoniacal. Digestor A.

En el segundo ensayo los valores de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal eran iguales en los primeros puntos (arranque), esto indicó que la mayoría del nitrógeno total era convertido a inorgánico, pero no era utilizado para el desarrollo de las bacterias. Una vez superado la etapa de arranque, la diferencia fue mayor por el consumo de las bacterias.

⁴⁰ Parámetros operativos del manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente. J. Field.

Es importante vigilar la concentración del nitrógeno total en el afluente porque de esta manera se conoce el grado de transformación de este a amoniacal (nutriente necesario para la población bacteriana), pero este último también causa toxicidad a las bacterias metanogénicas y puede neutralizar los AGV⁴¹ necesarios para la metanogénesis, por tanto es necesario conocer la concentración del nitrógeno amoniacal en el efluente, el cual representa la concentración en el digestor. De acuerdo con los datos reportados, la concentraciones de nitrógeno amoniacal más altas obtenidas durante el período de operación fueron de 0.35 g/l y 0.7 g/l, para los efluentes A y B respectivamente y para que estas sean nocivas se deben alcanzar concentraciones entre 1.5-3 g/l, a un pH mayor a 7.4.

- **Digestor B**

De igual forma, se verificó que la mayor parte de nitrógeno orgánico es transformado a nitrógeno amoniacal a la salida del digestor como consecuencia de la conversión biológica durante la degradación de los compuestos nitrogenados (proteína). Por otra parte la concentración de nitrógeno orgánico y amoniacal presentó tendencia al aumento con cada incremento en la carga.

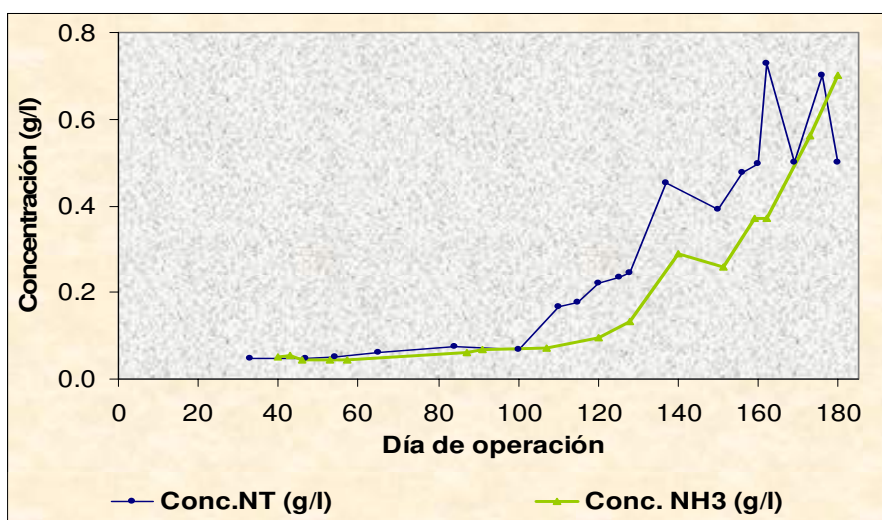


Figura No.27. Nitrógeno total vs. Nitrógeno amoniacal. Digestor B.

⁴¹ Olga Rojas. 1987.

Se observó un comportamiento distinto al final del ensayo, la concentración de nitrógeno amoniacal era mayor que el nitrógeno total debido a que se estaba degradando material acumulado.

Con respecto a la relación DQO:N, se determinó que con el incremento de la carga, la cantidad de nutrientes contenidos en el material orgánico aumentó⁴².

6.10.- Comportamientos de los Sólidos

La diferencia entre el contenido de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) proporciona una medida directa de los sólidos inorgánicos en el sistema, mientras que el contenido en SSV se considera habitualmente como un indicativo de la concentración de materia orgánica⁴³. presente en una fracción del efluente.

- **Digestor A**

Durante el primer ensayo, la relación SSV/SST estuvo en un rango del 75 – 90%.. Se observó que el contenido de SST no difiere mucho en relación a los SSV, esto significó pérdida excesiva de bacterias contenidas en el lodo del digestor⁴⁴.

⁴² Ver anexo A.4 y B.4.

⁴³ Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 1992.

⁴⁴ Parámetros Operativos del Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. J.Field.

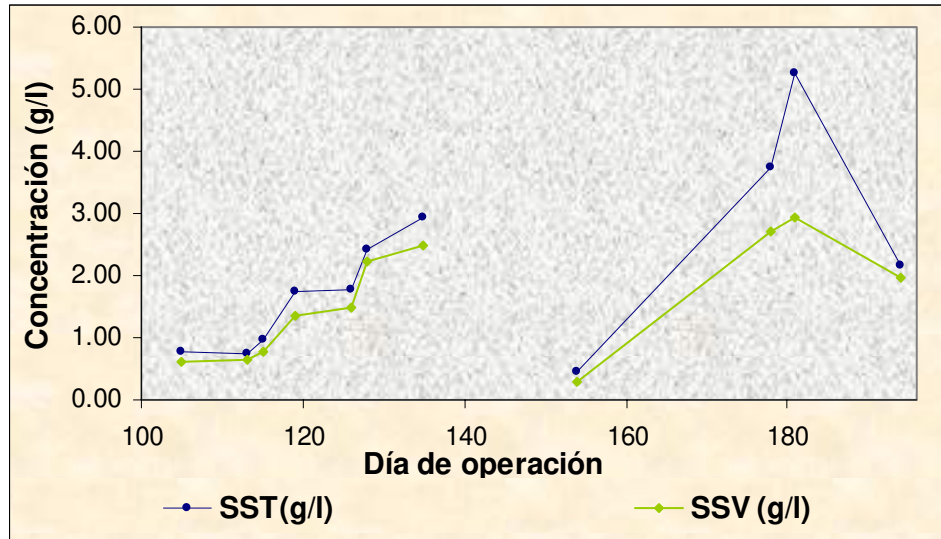


Figura No.28. Comportamiento de sólidos en el digestor A.

A medida que se desarrolló el experimento, el contenido de SST va incrementándose paralelo a los cambios de carga, llegando a alcanzar un valor máximo de 2.5 g/l. La relación SSV/SST mayor fue del 91.91% trabajando con una carga de 4.62 g DQO//d, lo cual demuestra el poco contenido de material inorgánico que no sedimenta (ver figura No. 28) y pérdida de biomasa producida por el exceso de agitación, provocado por las altas velocidades de alimentación.

En la segunda fase de ensayo, la diferencia entre SST y SSV fue más amplia, teniendo una relación SSV/SST que estuvo entre el 56 – 76% lo cual indica que hay una menor pérdida de biomasa. En la etapa final se determinó una relación SSV/SST del 91.16% representado en gran parte de materia orgánica (alimentación) que no pudo ser degradada por el efecto de la rápida alimentación, ya que por el análisis visual no se observó mucha presencia de lodo.

- **Digestor B**

Los valores de la relación SSV/SST estuvieron en el intervalo del 50 – 70%, esto significó que había mayor cantidad de material de tipo inorgánico, el cual no sedimenta y sale por el efluente, lo cual representa una mejor retención de biomasa. Se puede observar el comportamiento en la figura No. 28.

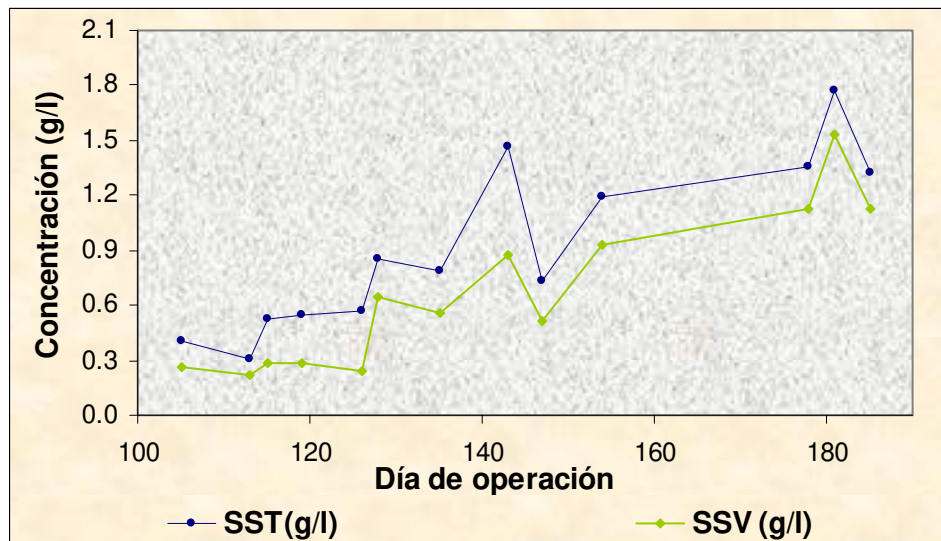


Figura No.29. Comportamiento de sólidos en el digestor B.

Durante la etapa final del ensayo, se determinó un contenido de SST de 1.77 g/l, operando con una carga de 5.6 g DQO/l/d, del cual 1.53 g/l representó los SSV, este valor indicó una pérdida en la concentración microbiana por el efluente, conocida como lavado.

Un incremento en la magnitud del contenido de los sólidos suspendidos totales en el efluente de ambos digestores, es un inconveniente en la operación de los mismos, ya que si éste está conformado en su mayoría por sólidos volátiles, entonces el lodo bacteriano está saliendo del reactor.

6.11.-Temperatura

A inicio de operaciones los reactores operaron a una temperatura mínima de 28°C y un máximo de 32°C, operando a una temperatura promedio de 30°C. Con el objetivo de elevarla y mejorar así la eficiencia, se instaló una termocupla conectada a dos resistencias térmicas (una para cada digestor) el día 57. La temperatura de operación en ambos reactores se mantuvo en $37 \pm 3^\circ\text{C}$, considerado adecuado, ya que los cambios de temperatura de esta magnitud en el intervalo mesofílico pueden ser normalmente tolerados por las bacterias.

Debido al descontrol del dispositivo regulador (termocupla) en ocasiones se incrementó la temperatura por encima de 42°C, este efecto se observó con más frecuencia en los dos ensayos del digestor A, como se muestra en la figura No.30. Esto no es aconsejable en reactores mesofílicos, ya que ocurre un rápido deterioro de las bacterias, y por consiguiente, se genera un descenso de la producción de biogás, fenómenos percibidos antes de detener operaciones en el digestor A.

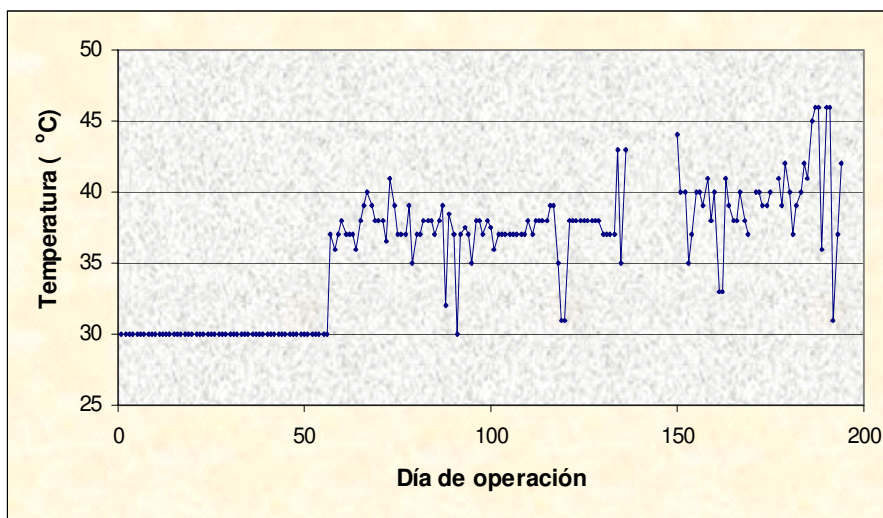


Figura No.30. Temperatura de operación en el digestor A.

La temperatura en el digestor B no sufrió oscilaciones muy grandes como para afectar a la población bacteriana metanogénica. Como se observa en la figura No.31 las mediciones tienden al valor promedio de 37.5°C; las temperaturas bajas se deben principalmente a interrupciones del flujo eléctrico.

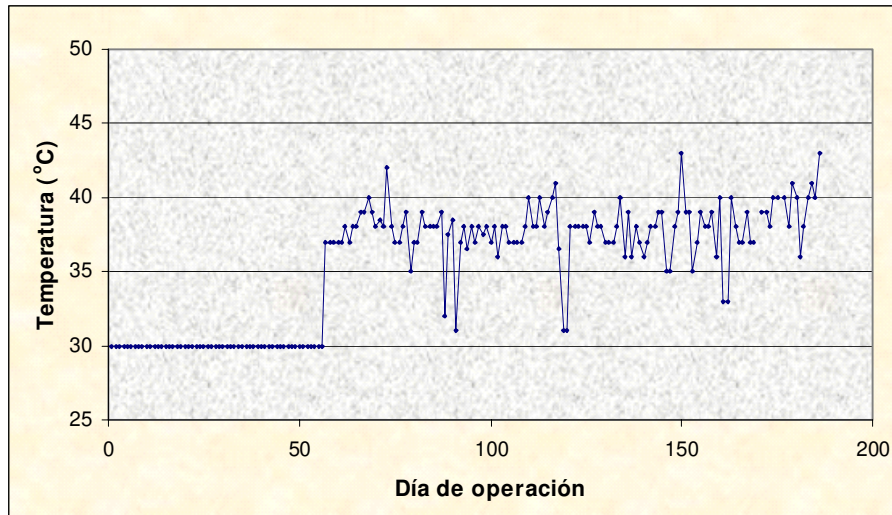


Figura. No 31. Temperatura de operación en el digestor B.

VII.- CONCLUSIONES

CONCLUSIONES PARTICULARES

De los resultados del presente trabajo se destacan los siguientes aspectos concluyentes, específicamente en lo relativo a operación, control y variables respuestas:

♦ El análisis fisicoquímico realizado a los sustratos no floculado y floculado (sustratos frescos) demuestran que posee alta concentración de materia orgánica 104.64 g DQO//l/d y 53.6 g DQO//l/d respectivamente y contienen los nutrientes necesarios para la digestión anaerobia. La exposición de los sustratos al proceso de hidrólisis provoca reducción de la DQO por el orden del 25% para el no floculado y 40% para el floculado, este último pierde mucho material orgánico que bien puede ser utilizado en la generación de biogás; pero aun así su contenido orgánico es alto. Por tanto, se requiere un factor de dilución elevado en la preparación de la alimentación (afluente), pues ningún digestor trabaja inicialmente con afluentes de alta carga orgánica⁴⁵.

⁴⁵ Arranque y operación de reactores UASB. Look Hulshoff.

♦ Las características de los afluentes (sustratos no floculado, digestor A y sustrato floculado, digestor B) mostraron influencia directa sobre la estabilidad de los digestores, resultando más conveniente el uso de sustrato floculado por las razones siguientes:

- La estabilidad proporcionada por el factor alcalinidad en el ensayo del digestor B es menos perturbada por los cambios de carga y la alteración en las condiciones normales de operación.
- El pH de ambos afluentes se corrige a cargas superiores de 3.5 g DQO//d y con mayor frecuencia en el afluente del digestor A.
- El digestor B alcanzó una carga 6.48 g DQO//d, mayor con respecto a los ensayos realizados con el digestor A donde se llegó a operar con 5.14 g DQO//d.
- El porcentaje de remoción una vez superado el período de arranque en el digestor A fue en promedio del 91%, mientras que el digestor B se alcanzó en promedio 82%; sin embargo, lo que interesa es obtener una buena producción y calidad de biogás.

- ♦ Debido a las irregularidades en las condiciones de operación de los ensayos no se pudo determinar las cargas máximas que pudieran tolerar los digestores, pero se presume que están alrededor de 5 g DQO//d para el digestor A y 6 g DQO//d para el digestor B.

- ♦ Las condiciones de trabajo no permitieron determinar con exactitud la carga óptima, así que se figuran según los mejores resultado obtenidos en productividad, para el digestor A por el orden de cargas de 3.5 – 5 g DQO//d y en el digestor B se presentó de 4.5 – 5.7 g DQO//d; de manera que la productividad más alta que se obtuvo en el digestor A (sustrato no floculado) fue 1.22 l/biogás//digestor y 1.33 l/biogás//digestor para el digestor B (sustrato floculado) a una carga de 5.07 g DQO//d en ambos digestores.

- ♦ La calidad del biogás medida estuvo en promedio del 72%, para ambos digestores. Demostrando que el biogás obtenido, tiene la suficiente calidad para utilizarlo en la obtención de energía, además es satisfactorio con el valor teórico estimado por la literatura.

- ♦ El rendimiento de los digestores A y B no mantuvo un comportamiento uniforme; por la calidad de inóculo (el segundo ensayo del digestor A presento mejor rendimiento por el nuevo inóculo) y las condiciones en que se operó ya que las bacterias son bastantes sensibles a las modificaciones de su medio.

CONCLUSIONES GENERALES

Los dos ensayos llevados a cabo en el presente trabajo permitieron confirmar, que el extracto del follaje del Marango (*Moringa oleifera L.*) puede usarse como sustrato para la generación de biogás, fuente alterna para la generación de energía.

Por las características del sustrato floculado se concluye que la operatividad del digestor B fue mejor, permitiendo operar a carga más alta y obtener superior rendimiento y productividad; debido a mayor producción de biogás. Además tolera las condiciones adversas, siempre y cuando no sea continuamente expuesto a estas.

Sin embargo, el proceso de floculación conlleva aplicar temperatura (gasto de energía) por un tiempo mayor con respecto al aumento del volumen a flocular y pérdida de material aprovechable, durante la hidrólisis, útil para la generación de biogás.

VIII.- RECOMENDACIONES

Se hace necesario llevar cabo la adaptación de las bacterias para que operen con alimentaciones a pH bajo mediante una reducción paulatina del mismo en la alimentación. De igual manera, se recomienda la recirculación de efluente para ahorrar alcalinizante y agua de dilución, así como también aprovechar el DQO restante en el efluente.

Para un eventual arranque de un digestor a una escala mayor, se recomienda un estudio de diferentes inóculos, para encontrar el de mejor adaptación a las condiciones del sistema y el sustrato, ya que los utilizados en los ensayos de los digestores A y B presentaron deficiencia.

IX.- NOMENCLATURA

9.1. - GLOSARIO

Afluente: Caudal de sustrato diluido que se alimenta al sistema o digestor.

Caracterización: Es un proceso que consiste en la realización de una serie de análisis al sustrato hidrolizado A y B, así como y al sustrato diluido Ay B con el objetivo de determinar las características físicas y químicas para su posterior análisis.

Carga orgánica volumétrica (COV): Es la cantidad de sustrato diluido alimentado al digestor en un día por unidad de volumen usualmente expresada Kg DQO/m³/d o g DQO//d.

Caudal: Es el volumen de sustrato diluido medido en la unidad de tiempo, las unidades de medida mas usuales m³/s o //d.

Demanda química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno que demanda la materia orgánica cuando es oxidada y convertida en dióxido de carbono y aguas por la acción de un fuerte oxidante en condiciones ácidas.

Efluente: Caudal de sale de las instalaciones de los digestores A y B.

Floculación⁴⁶: consiste en la aglomeración de las partículas pequeñas recién desestabilizadas (referente a su carga) para que crezcan formando flocúlos de mayor tamaño fácilmente removibles por sedimentación y/o filtración.

Follaje: Término referido a los órganos aéreos de la planta, generalmente hojas y tallos no leñosos. Ocasionalmente incluye flores y frutos.

Inoculación del reactor: Introducción de microorganismos (preferiblemente bacterias), encargadas de la degradación biológica de la materia orgánica presente en los sustratos diluidos, aportados (los microorganismos) por residuos albañales, excretas de vacas o cerdos que son introducidos en su arranque.

Lodo: Sólidos acumulados separados de los residuales generados en los sistemas de tratamientos o digestores.

Parámetros: Es un valor cualquiera de una variable independiente que se refiere a un elemento a atributo que permite calificar o cuantificar una propiedad determinada del cuerpo físico en cuanto a ciertas propiedades.

Periodo de retención: tiempo óptimo transcurrido entre la entrada del sustrato diluido y la salida del mismo en los digestores A y B.

⁴⁶ Ver fotos en Anexos E.2

pH: Es un indicador de medida utilizado universalmente para expresar la concentración del ión hidrógeno, o mas precisamente su actividad.

Sólidos totales: Son los obtenidos al evaporar cierta cantidad de muestra de afluente o efluente hasta la sequedad, comprende todos los sólidos, tanto los disueltos como los suspendidos y los residuos de la evaporación.

Sustrato diluido: Es una porción del sustrato hidrolizado que ha sido diluido en agua potable en un volumen tal que se obtenga 16 litros, también se le llama afluente.

Sustrato hidrolizado A: Es el liquido fresco previamente extraído que somete directamente al proceso de hidrólisis.

Sustrato hidrolizado B: El liquido fresco que ha sido floculado para remover la proteína y fibra, para luego pasar al proceso de hidrólisis.

9.2.- SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado	Unidades
AGV	Ácidos grasos volátiles	meq/l
Conc.	Concentración	
CH ₄	Metano	
COV	Carga orgánica volumétrica	g DQO/l/d
d	Días	
DQO	Demanda química de oxígeno	g DQO/l
EA	Efluente A	
EB	Efluente B	
g	Gramos	
Hrs	Horas	
l	Litros	
m	Metros	
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar	m
N	Nitrógeno	g/l
NT	Nitrógeno total	g/l
NH ₃	Nitrógeno amoniacal	g/l
q	Caudal	l/d
SDA	Sustrato diluido A ó afluente.	
SDB	Sustrato diluido B ó afluente.	
SF	Sustrato floculado	
SHA	Sustrato hidrolizado A	
SHB	Sustrato hidrolizado B	

SNF	Sustrato no floculado	
ST	Sólidos totales	g/l
SV	Sólidos volátiles	g/l
T.R.	tiempo de retención	

X.- BIBLIOGRAFÍA

Aplicación de Marango (Moringa Oleifera) para la clarificación del agua en la potabilizadora de Juigalpa. Francisco Silva, María Mercedes Álvarez. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua. Febrero, 1998.

Arranque y estabilización de un reactor UASB con inóculo para el tratamiento de las aguas residuales del Ingenio Victoria de Julio. Sonia González Espinoza, Claudia González González. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua. Noviembre, 1997.

Arranque y operación de reactores UASB. Look Hulshoff. Universidad Agrícola de Wageningen Holanda.

Biogás: Aspectos Básicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Biogás: Teoría, Factores que afectan la fermentación anaerobia. Universidad Nacional de Ingeniería. Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Conferencia: Tratamiento Mediante Reactores Anaerobios. Curso Tratamiento de Aguas Residuales. Año 2002. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano.

Conversion Processes in Anaerobic Digestión. W. Mújer, A.J.B. Zehnder. Swiss Federal Institute for Water Resources and Water Pollution Control (EAWAG), CH-8600 Dübendorf, Switzerland.

Curso de Capacitación: Biogás, Aspectos Básico. Red Nacional de Biogás y Sanidad Ambiental. Empresa Nacional Porcina de R.A. Managua, Nicaragua, 1984. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Curso de Capacitación: Biogás, Aspectos Básico. Red Nacional de Biogás y Sanidad Ambiental. Managua, Nicaragua, 1987. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Curso de Capacitación sobre biogás y subproductos del café. Universidad Nacional de Ingeniería. Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios. Managua, Nicaragua, 1987. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Degradación anaeróbica de compuestos orgánicos. Universidad agrícola de Wageningen. Holanda. Jim Field. 1987.

Difusión de la tecnología del biogás en Colombia. R. Nigiani. Publicación (GTZ) GmbH, 1987.

Digestión Anaerobia para el Tratamiento de Residuos Orgánicos – El Caso Perú , Octubre de 2004.

Digestores. Universidad Nacional de Ingeniería. Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios. Archivos Proyecto ASTEC-UNI BIOMASA.

Diseño de una planta de biogás en el rastro de Granada. Claudia Marina Lorente. Filo Javier Miranda. Universidad Nacional de Ingeniería. Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios. FTC. 1998.

Elaboración de una propuesta para el tratamiento anaerobio de la vinaza a cargas altas. Regina del Carmen Centeno Padilla. UNAN-León. León, Nicaragua. Junio, 1994.

La Bioconversión de la Energía. José M. Vega, Francisco Castillo, Jacobo Cárdena. EDICIONES PIRÁMIDE, S.A. Impreso en Madrid, 1983.

Medición de parámetros de biogás. Universidad de Wageningen, Holanda. 1987.

Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. APHA, AWWA, WPCF. Ediciones Díaz de Santos S.A. Madrid, España. 1992

Mini y Microplantas Hidroeléctricas y su papel en Nicaragua. Compañero Benito Juárez. INE, Managua, Nicaragua, 2003.

Microbiología. Universidad Agrícola de Wageningen. Holanda. Frank Zegers.. 1987.

Obtención de biogás a partir de vinaza. Juan Carlos García. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua. 1993.

Operación y Control de Digestores Anaerobios. Manuel Soto, Ramón Méndez, Juan Lema. Departamento de Exeñeria Química. Universidad de Santiago de Compostela. Galiza.

Producción de biogás a partir de la torta de tempate. María Victoria Arbizú. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua. Febrero, 1993.

Relación alcalinidad – ácidos grasos. Universidad del Valle. Colombia. 1987.

Seminario sobre tratamiento anaerobio de las aguas residuales orgánicas". Nikolaus Foidl, G. Foidl, E. Sobalvarro, E. Zamora, V. Cáceres. Universidad Nacional de Ingeniería, RUPAP – DINOT. Departamento Biomasa, Proyecto Süche & Holzer. Managua, Nicaragua. Mayo, 1994.

Uso de un digestor UASB para el tratamiento anaeróbico de vinaza de melaza de caña. I. Sanchez, P. Córdoba, F. Señeriz. Biotechnology and Bioengineering, Magazine, Vol. 27, 1985.

Un estudio sobre el tratamiento biológico (anaeróbico / aeróbico) de las aguas residuales de una destilería. Zhu Junhuang Guan. Department of Environment Engineering. Xi'an Highway Institute. China Biogás, 1990. Traducido por: Zhang Mi. Biogás Forum, Edición especial, 1992.

Referencias en la Web

www.elnuevodiario.com.ni:

<http://archivo.elnuevodiario.com.ni/2004/febrero/20-febrero-2004/nacional/www.envio.org.ni/articulo/862>. Fecha de visita: 20-12-2005. Autor: Marcia Estrada G.

Cultivo del marango para producción de proteínas y energía:

<http://archivo.elnuevodiario.com.ni/2000/marzo/26-marzo-2000/index.html>.

Domingo 26 de Marzo de 2000 | Managua, Nicaragua. Fecha de visita: 02-01-2006.

www.laprensa.com.ni:

<http://www.laprensa.com.ni/archivo/2005/septiembre/01/nacionales/>. JUEVES 1 DE SEPTIEMBRE DEL 2005 / EDICION No. 23919 / ACTUALIZADA 03:00 am. Fecha de visita: 20-12-2005. Autor: Wilder Perez R.

<http://www-ni.laprensa.com.ni/archivo/2001/diciembre/28/economia>. 2001 / EDICION No. 22595 / ACTUALIZADA 02:00 am. Fecha de visita: 20-12-2005. Autor: Juan Carlos Bow.

<http://www-ni.laprensa.com.ni/archivo/2003/junio/23/campoyagro/campoyagro-20030623-01.html>. LUNES 23 DE JUNIO DEL 2003 / EDICION No. 23128 / ACTUALIZADA 1:00 am. Fecha de visita: 02-01-2006. Giselle Alemán Ayala.

<http://www-ni.laprensa.com.ni/archivo/2005/julio/01/opinion/opinion-20050701-01.html> VIERNES 1 DE JULIO DEL 2005 / EDICION No. 23857 / ACTUALIZADA 03:00 am. Fecha de visita: 02-01-2006. Autor> Humberto Cuadra.

Conferencia electrónica de la FAO sobre "Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica":

<http://www.fao.org/WAICENT/FaoInfo/Agricult/AGA/AGAP/FRG/AGROFOR1/AgroFoidl16.htm> . Fecha de visita: 02-01-2006. Autor> Walter Lacayo.

Factores que afectan a la fermentación anaerobia:

http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.66.01.21_2r.html. Fecha de visita: 20-12-2005

<http://www.pnud.org.ni/index.php>:

Publicado en el diario La Prensa el 14 de diciembre de 2005

<http://www-ni.laprensa.com.ni/archivo/2005/diciembre/14/especiales/especiales-20051214-06.html>. Fecha de visita: 20-12-2005. Autor: Walter Lacayo.

www.textoscientificos.com.

<http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>. Fecha de visita: 20-12-2005

[www.wikipedia.com](http://es.wikipedia.org)

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Biogas&redirect=no>. Fecha de visita: 20-12-2005

XI.- ANEXOS

ANEXO A

TABLAS DE RESULTADOS

DIGESTOR A

A.1.-. Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad en el Digestor A

Día	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
1	0.33	-	6.90	0.48
2	0.31	-	7.02	0.48
3	0.32	-	7.59	0.43
4	0.32	-	7.29	0.45
5	0.32	6.30	7.28	0.45
6	0.33	6.70	7.11	0.46
7	0.31	6.23	6.89	0.43
8	0.32	7.10	7.08	0.41
9	0.32	6.93	7.16	0.43
10	0.32	6.80	7.27	0.43
11	0.32	6.50	7.00	0.42
12	0.32	6.43	6.75	0.41
13	0.30	6.80	6.75	0.43
14	0.27	7.25	6.79	0.42
15	0.34	6.85	6.78	0.45
16	0.32	6.81	6.82	0.42
17	0.29	6.72	6.76	0.43
18	0.28	6.76	6.87	0.39
19	0.29	6.78	6.80	0.33
20	0.27	6.70	6.84	0.34
21	0.27	7.01	6.91	0.33
22	0.26	6.95	6.90	0.34
23	0.26	6.56	6.92	0.35
24	0.31	6.75	6.84	0.35
25	0.30	6.67	6.92	0.34
26	0.29	6.93	6.79	0.37
27	0.24	6.89	6.87	0.32
28	0.30	6.93	6.91	0.36
29	0.29	6.94	6.86	0.34
30	0.30	6.95	6.89	0.36
31	0.29	6.99	7.06	0.3
32	0.30	7	7.01	0.31
33	0.30	7	7	0.3
34	0.28	6.69	7.04	0.29
35	0.30	6.8	7.05	0.33
36	0.29	6.81	7	0.34
37	0.29	7.01	7.12	0.31

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor A

Día	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
38	0.26	6.73	6.89	0.33
39	0.32	6.81	7.06	0.3
40	0.26	6.66	7.05	0.3
41	0.32	6.81	7.01	0.35
42	0.28	6.93	7	0.34
43	0.27	6.81	7.00	0.33
44	0.24	7	7.11	0.32
45	0.33	6.99	7.01	0.36
46	0.27	6.94	7.00	0.29
47	0.32	6.86	7.01	0.34
48	0.37	7.32	6.96	0.47
49	0.30	7.25	6.97	0.36
50	0.23	6.96	7	0.32
51	0.10	6.96	6.98	0.32
52	0.34	7.05	6.95	0.44
53	0.30	6.92	6.84	0.42
54	0.41	7.33	6.77	0.45
55	0.35	7.29	6.89	0.42
56	0.34	6.97	6.94	0.47
57	0.10	7	7.2	0.39
58	0.25	6.71	7.2	0.36
59	0.23	6.84	7.34	0.33
60	0.30	6.76	7.17	0.32
61	0.18	7	7.2	0.29
62	0.26	6.9	7.15	0.28
63	0.40	6.86	7.2	0.25
64	0.42	7.2	7.16	0.38
65	0.31	6.69	7.17	0.36
66	0.36	6.75	7.1	0.27
67	0.39	7.08	7.17	0.28
68	0.40	7.7	7.13	0.26
69	0.45	7.2	7.14	0.27
70	0.27	7	7.08	0.27
71	0.13	6.96	7.03	0.28
72	0.46	7.3	7	0.29
73	0.51	7.6	7.08	0.29
74	0.58	7.09	6.96	0.24
75	0.50	6.93	7.05	0.28
76	0.56	6.86	7.08	0.31

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor A.

Día	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
77	0.35	6.88	7.12	0.29
78	0.52	6.96	7.02	0.29
79	0.74	6.87	6.97	0.33
80	0.77	6.89	7.01	0.27
81	0.64	6.9	7.05	0.28
82	0.64	7.2	7.03	0.32
83	0.46	7.03	6.98	0.3
84	0.35	7	7.05	0.28
85	0.68	7.2	7.02	0.28
86	0.90	7.4	7.05	0.29
87	0.79	7.31	7.05	0.27
88	0.82	7.7	7.06	0.26
89	0.51	6.86	7.15	0.26
90	0.85	6.91	6.98	0.33
91	0.77	6.8	7.04	0.3
92	0.94	6.87	7.2	0.26
93	0.91	7	7.2	0.26
94	1.23	6.38	7.16	0.26
95	1.03	6.85	7	0.27
96	1.16	6.8	7.1	0.27
97	1.35	7.17	7.16	0.25
98	1.27	7	7.17	0.27
99	1.35	7.01	7.02	0.36
100	1.78	7.6	7.2	0.35
101	1.43	7.33	7.07	0.32
102	1.58	7.4	7.18	0.33
103	1.71	6.87	7.2	0.28
104	1.11	7.02	7.1	0.29
105	1.95	7.6	7.25	0.22
106	1.87	7.3	7.15	0.29
107	1.99	7.23	7.1	0.26
108	2.03	7.02	7.25	0.23
109	2.35	6.84	7.2	0.24
110	2.37	7.02	7.23	0.25
111	2.49	7.11	7.2	0.27
112	2.68	6.4	7.4	0.26
113	3.00	7.1	7.5	0.22
114	3.18	6.56	7.35	0.26
115	3.93	6.7	7.3	0.27
116	4.30	7.35	7.35	0.32

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor A

Día	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
117	3.80	6.35	7.4	0.31
118	3.59	6.83	7.4	0.28
119	3.73	7.23	7.4	0.28
120	3.78	7.01	7.2	0.27
121	3.73	6.6	7.07	0.27
122	5.37	7.01	7.34	0.36
123	5.31	6.77	7.46	0.34
124	5.37	6.7	7.36	0.35
125	4.84	6.8	7.37	0.41
126	4.46	6.3	8	0.4
127	4.37	7.2	7.37	0.37
128	4.62	7.1	7.3	0.39
129	-	7.01	7.3	0.4
130	4.56	6.88	6.98	0.51
131	4.56	6.66	6.82	0.6
132	4.73	7	6.64	0.64
133	4.73	7.3	6.6	0.64
134	4.56	7.3	6.5	0.67
135	4.56	7.1	6.56	0.68
136	4.56	7.4	6.42	0.7
149	Segundo Ensayo			
150	0.45	7	6.86	0.3
151	0.45	7.3	6.92	0.22
152	0.45	7.23	6.89	0.29
153	0.19	7.2	7	0.25
154	1.00	7.12	7.01	0.23
155	0.90	7.01	7.01	0.31
156	0.98	7.02	7.02	0.26
157	1.01	7.05	7.06	0.24
158	1.01	7.29	6.94	0.32
159	1.01	7.01	7	0.27
160	1.40	7	7.01	0.35
161	0.56	7.15	7	-
162	-	-	-	-
163	1.48	7.12	6.91	0.26
164	1.50	7.06	7.2	0.3
165	1.52	6.98	7.24	0.21
166	1.66	7.05	7.14	0.25
167	1.66	7.14	7.14	0.22
168	1.78	7.05	7.16	0.22

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor A

Día	C.O.V (g//d)	pHafluente	pHefluente	Factor Alcalinidad
169	4.05	7	7.01	0.27
170	4.10	7	7.01	0.27
171	5.07	6.6	7.1	0.25
172	5.07	6.85	7.19	0.28
173	5.14	6.95	7.36	0.25
174	3.66	6.9	7.4	0.29
175	3.54	6.54	7.26	0.3
176	4.12	6.67	7.1	0.32
177	4.28	6.56	7.33	0.23
178	4.54	6.53	7.39	0.24
179	4.47	6.35	7.36	0.3
180	4.47	6.35	7.38	0.29
181	4.20	6.29	7.5	0.3
182	4.05	6.3	7.53	0.3
183	4.57	6.7	7.51	0.36
184	4.68	6.66	7.44	0.33
185	4.65	6.75	7.37	0.36
186	4.65	6.66	7.41	0.36
187	4.65	6.82	7.33	0.34
188	4.88	6.78	7.28	0.4
189	4.84	6.76	7	0.46
190	4.60	6.6	7.1	0.46
191	4.51	6.8	6.81	0.62
192	3.90	6.69	6.61	0.6
193	3.90	6.69	6.76	0.58
194	3.90	7.06	6.56	0.62
195	4.22	7	7.01	0.71

A.2.- Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor A

Día	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO (%)
6	1.64	1.34	52.98
7	1.61	1.71	-
8	1.62	1.39	14.20
9	1.64	1.43	12.80
10	1.64	1.43	12.80
11	1.64	1.43	12.80
12	1.64	1.43	12.80
13	1.52	1.27	16.45
14	1.56	0.60	61.54
15	1.56	1.33	14.74
16	1.64	0.93	43.29
17	1.60	0.71	55.63
18	1.60	0.71	55.63
19	1.60	0.71	55.63
20	1.65	0.75	54.30
21	1.50	0.54	64.00
22	1.50	0.55	63.33
23	1.54	0.58	62.34
24	1.63	0.58	64.42
25	1.63	0.58	64.42
26	1.63	0.58	64.42
27	1.50	0.38	74.67
28	1.58	0.28	82.28
29	1.61	0.25	84.47
30	1.63	0.32	80.37
31	1.61	0.25	84.47
32	1.61	0.25	84.47
33	1.61	0.25	84.47
34	1.66	0.31	81.33
35	1.68	0.30	82.14
36	1.68	0.30	82.14
37	1.64	0.32	80.49
38	1.73	0.32	81.50
39	1.73	0.32	81.50
40	1.73	0.32	81.50
41	1.7	1.7	0.00
42	1.64	1.64	0.00
43	1.66	1.66	0.00
44	1.67	1.67	0.00

Continuación... Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor A

Día	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO (%)
45	1.63	1.63	0.00
46	1.63	1.63	0.00
47	1.63	1.63	0.00
48	1.80	0.46	74.44
49	1.84	0.48	73.91
50	1.70	0.54	68.24
51	1.70	0.57	66.47
52	1.80	0.54	70.00
53	1.80	0.54	70.00
54	1.80	0.54	70.00
55	1.86	0.36	80.65
56	1.86	0.36	80.65
57	1.81	0.66	63.54
58	1.80	0.14	92.22
59	1.71	0.32	81.29
60	1.71	0.32	81.29
61	1.71	0.32	81.29
62	2.10	0.22	89.52
63	2.00	0.20	90.00
64	1.96	0.31	84.18
65	1.93	0.23	88.08
66	2.00	0.29	85.50
67	2.00	0.29	85.50
68	2.00	0.29	85.50
69	2.52	0.17	93.25
70	2.52	0.17	93.25
71	2.53	0.14	94.47
72	2.5	0.11	95.60
73	2.76	0.12	95.65
74	2.76	0.12	95.65
75	2.76	0.12	95.65
76	2.8	0.21	92.50
77	2.81	0.16	94.31
78	3.36	0.16	95.24
79	3	0.19	93.67
80	3.5	0.3	91.43
81	3.5	0.3	91.43
82	3.5	0.3	91.43

Continuación... Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor A

Día	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO (%)
83	4	0.15	96.25
84	4	0.15	96.25
85	4	0.15	96.25
86	4.3	0.15	96.51
87	4.2	0.16	96.19
88	4.2	0.16	96.19
89	4.2	0.16	96.19
90	4.81	0.22	95.43
91	4.81	0.17	96.47
92	4.79	0.24	94.99
93	4.79	0.29	93.95
94	5.75	0.27	95.30
95	5.75	0.27	95.30
96	5.75	0.27	95.30
97	7.1	0.23	96.76
98	6.82	0.23	96.63
99	6.82	0.26	96.19
100	8.1	0.25	96.91
101	8.1	0.28	96.54
102	8.1	0.28	96.54
103	8.1	0.28	96.54
104	9.1	0.36	96.04
105	10	0.42	95.80
106	9.68	0.31	96.80
107	10.2	0.39	96.18
108	12.04	0.34	97.18
109	12.04	0.34	97.18
110	12.04	0.34	97.18
111	12	0.52	95.67
112	13.24	0.61	95.39
113	14.8	1.6	89.19
114	15	0.73	95.13
115	18.66	1.05	94.37
116	18.66	1.05	94.37
117	18.66	1.05	94.37
118	19	2.23	88.26
119	19.11	2.22	88.38
120	19.11	3.54	81.48

Continuación... Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor A

Día	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO (%)
121	19.11	4.42	76.87
122	26.54	4.88	81.61
123	26.54	4.88	81.61
124	26.54	4.88	81.61
125	24.5	6.06	75.27
126	21.5	6.3	70.70
127	22.12	6.3	71.52
128	23.38	7.14	69.46
129	23.38	7.14	69.46
130	23.38	7.14	69.46
131	23.38	7.14	69.46
132	23.38	9	61.51
133	23.38	9	61.51
134	23.38	9	61.51
135	2.7	8.01	-
136	2.7	5.48	-
149	Segundo Ensayo		
150	2.33	0.16	93.13
151	2.33	0.16	93.13
152	2.33	0.16	93.13
153	5.12	0.18	96.48
154	5.12	0.18	96.48
155	4.6	0.26	94.35
156	5	0.26	94.80
157	5.16	0.36	93.02
158	5.16	0.36	93.02
159	5.16	0.36	93.02
160	7.1	0.28	96.06
161	7.1	0.28	96.06
162	-	-	-
163	7.6	0.29	96.18
164	7.6	0.29	96.18
165	7.6	0.29	96.18
166	8.5	0.41	95.18
167	8.5	0.41	95.18
168	9.1	0.36	96.04
169	20	0.6	97.00
170	21	0.8	96.19

Continuación... Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor
A

Día	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO (%)
171	26	0.9	96.54
172	26	0.9	96.54
173	26	0.9	96.54
174	18.3	2	89.07
175	18.2	2.04	88.79
176	21.12	2.1	90.06
177	21.92	2.38	89.14
178	22.89	2.3	89.95
179	22.89	2.3	89.95
180	22.89	2.3	89.95
181	21	2.3	89.05
182	21	2.5	88.10
183	23.42	2.4	89.75
184	24	2.5	89.58
185	23.85	4.49	81.17
186	23.85	4.49	81.17
187	23.85	4.49	81.17
188	25	7.07	71.72
189	24.82	7.07	71.51
190	23.6	8.7	63.14
191	23.1	8.5	63.20
192	20	11.56	42.20
193	20	11.56	42.20
194	20	11.56	42.20
195	21.65	12.97	40.09

A.3.-.. Valores diarios de producción, productividad y rendimiento. Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor A

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
6	3.35		0.03	-
7	2.35		0.02	-
8	5.02		0.04	0.98
9	3.98		0.03	0.85
10	4.85		0.04	1.04
11	7.00		0.06	1.50
12	0.10		0.00	0.02
13	2.30		0.02	0.41
14	3.80		0.03	0.20
15	3.10		0.03	0.54
16	8.15		0.07	0.51
17	4.85		0.04	0.27
18	4.10		0.04	0.23
19	5.10		0.04	0.28
20	2.80		0.02	0.17
21	5.25		0.05	0.26
22	5.40		0.05	0.29
23	4.85		0.04	0.26
24	9.15		0.08	0.41
25	5.35		0.05	0.24
26	6.20		0.05	0.29
27	2.60		0.02	0.13
28	6.35		0.06	0.23
29	5.60		0.05	0.20
30	7.35		0.06	0.27
31	6.90		0.06	0.25
32	7.15		0.06	0.25
33	6.25		0.05	0.22
34	3.40		0.03	0.13
35	5.40		0.05	0.19
36	4.80		0.04	0.18
37	8.85		0.08	0.33
38	9.40		0.08	0.38
39	3.25		0.03	0.11
40	4.90		0.04	0.21
41	9.50		0.08	0.29
42	4.20		0.04	0.15
43	1.20		0.01	0.04

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor A

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
44	1.80		0.02	0.07
45	10.10		0.09	0.30
46	1.80		0.02	0.07
47	4.50		0.04	0.14
48	0.00		0.00	0.20
49	0.00		0.00	0.25
50	3.30		0.03	0.18
51	1.25		0.01	0.17
52	2.85		0.02	0.11
53	2.10		0.02	0.09
54	3.45		0.03	0.11
55	2.30		0.02	0.07
56	3.45		0.03	0.11
57	2.50		0.02	0.34
58	7.60		0.07	0.28
59	10.40		0.09	0.49
60	7.00		0.06	0.25
61	4.70		0.04	0.28
62	7.50		0.07	0.29
63	0.00		0.00	-
64	0.00		0.00	-
65	2.20		0.02	0.07
66	21.00		0.18	0.59
67	9.30		0.08	0.25
68	9.40		0.08	0.24
69	9.65		0.08	0.20
70	4.35		0.04	0.15
71	2.90		0.03	0.21
72	8.05		0.07	0.16
73	9.05		0.08	0.16
74	11.30		0.10	0.18
75	8.55		0.08	0.16
76	8.85		0.08	0.15
77	0.30		0.00	0.01
78	0.20		0.00	-
79	20.50		0.18	0.26
80	23.65		0.21	0.30
81	12.85		0.11	0.19
82	15.90		0.14	0.24
83	14.00		0.12	0.28

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor A

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
84	9.60		0.08	0.25
85	10.90		0.10	0.15
86	21.00		0.18	0.21
87	13.80		0.12	0.16
88	13.00		0.11	0.14
89	15.75		0.14	0.28
90	15.20		0.13	0.17
91	18.95		0.17	0.22
92	12.55		0.11	0.12
93	17.55		0.15	0.18
94	23.10	70	0.20	0.17
95	20.50		0.18	0.18
96	21.30		0.19	0.17
97	23.60		0.21	0.16
98	21.20		0.19	0.15
99	34.30	76.4	0.30	0.23
100	24.40		0.21	0.12
101	34.20		0.30	0.22
102	46.20		0.41	0.27
103	48.60		0.43	0.26
104	43.80		0.38	0.36
105	45.00		0.39	0.21
106	32.80		0.29	0.16
107	52.00		0.46	0.24
108	45.40	76	0.40	0.20
109	49.20		0.43	0.19
110	52.60		0.46	0.20
111	55.40		0.49	0.20
112	73.50		0.64	0.25
113	71.30	72	0.63	0.23
114	71.20		0.62	0.21
115	108.20		0.95	0.26
116	95.40		0.84	0.21
117	101.80		0.89	0.25
118	89.30		0.78	0.25
119	65.10	70	0.57	0.17
120	59.50		0.52	0.17
121	65.60		0.58	0.20
122	103.80		0.91	0.21
123	82.60		0.72	0.17

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor A

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
124	91.10		0.80	0.16
125	84.20		0.74	0.20
126	100.70	67.8	0.88	0.28
127	72.40		0.64	0.20
128	84.30		0.74	0.23
129	32.45		0.28	-
130	39.55		0.35	0.11
131	31.10		0.27	0.09
132	15.40		0.14	0.05
133	13.90		0.12	0.04
134	4.20		0.04	0.01
135	5.30		0.05	-
136	4.10		0.04	-
137				
149	Segundo Ensayo			
150				-
151	8.30		0.07	0.17
152	10.80		0.09	0.22
153	13.30		0.12	0.65
154	19.85		0.17	0.18
155	24.85		0.22	0.26
156	29.05		0.25	0.28
157	26.05		0.23	0.24
158	36.40		0.32	0.34
159	36.40		0.32	0.34
160	27.40	71.6	0.24	0.18
161	29.20		0.26	0.47
162	4.30		0.04	-
163	30.10		0.26	0.19
164	38.30		0.34	0.23
165	30.30		0.27	0.18
166	29.30		0.26	0.16
167	35.20	75.1	0.31	0.20
168	40.90		0.36	0.21
169	53.90		0.47	0.12
170	97.40		0.85	0.22
171	79.40	69	0.70	0.14
172	139.00		1.22	0.25

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor A

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
173	133.60		1.17	0.24
174	86.40		0.76	0.23
175	127.40		1.12	0.36
176	123.00	73.1	1.08	0.29
177	103.00		0.90	0.24
178	94.60	75.2	0.83	0.20
179	112.90		0.99	0.25
180	112.80		0.99	0.25
181	110.20		0.97	0.26
182	116.10	71.4	1.02	0.29
183	137.50		1.21	0.29
184	119.90		1.05	0.25
185	125.90	68.7	1.10	0.29
186	84.40		0.74	0.20
187	86.10		0.76	0.20
188	62.30		0.55	0.16
189	31.10	49	0.27	0.08
190	30.80		0.27	0.09
191	24.90		0.22	0.08
192	12.00	36.5	0.11	0.06
193	14.40		0.13	0.08
194	15.50		0.14	0.08
195	20.60		0.18	0.11
196	12.30		0.11	0.06

A.4.-. Concentración de nitrógeno Total. Relación DQO: NT en el Digestor A

Día	DQO	Conc.NT A (g/l)	DQO : NT
38	1.73	0.07	350 : 14
49	1.84	0.08	350 : 14
52	1.80	0.08	350 : 15
59	1.71	0.06	350 : 12
70	2.52	0.08	350 : 11
89	4.20	0.14	350 : 12
105	10.00	0.15	350 : 5
115	18.66	0.37	350 : 7
120	19.11	0.46	350 : 8
125	24.50	0.52	350 : 7
130	23.38	0.48	350 : 7
133	23.38	0.53	350 : 8
155	4.60	0.13	350 : 10
161	7.10	0.18	350 : 9
165	7.60	0.20	350 : 9
168	9.10	0.30	350 : 12
185	23.85	0.50	350 : 7

A.5.-. Concentración de Nitrógeno amoniacal. Digestor A

Día	COV	Conc. NH3(g/l)
38	0.26	0.06
45	0.33	0.06
51	0.10	0.06
57	0.10	0.07
65	0.31	0.04
92	0.94	0.09
95	1.03	0.10
112	2.68	0.18
125	4.84	0.34
133	4.73	0.35
156	0.98	0.12
164	1.50	0.15
178	4.54	0.31
194	3.90	0.27

A.6.-.. Comportamiento de Sólidos Suspendidos en el Digestor A

Día de operación	Carga	SST(g/l)	SSV (g/l)	SSV/SST (%)
105	1.95	0.78	0.60	77.81
113	3.00	0.75	0.64	84.90
115	3.93	0.96	0.78	81.43
119	3.73	1.76	1.35	76.87
126	4.46	1.79	1.49	83.38
128	4.62	2.42	2.22	91.91
135	4.56	2.93	2.49	84.89
154	1.00	0.44	0.31	69.61
178	4.54	3.74	2.72	72.89
181	4.20	5.26	2.93	55.76
194	3.90	2.15	1.96	91.16

ANEXOS B

TABLAS DE RESULTADOS

DIGESTOR B

B.1.-.. Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
1	0,3	-	-	0,47
2	0,29	-	7,37	0,47
3	0,31	-	-	0,45
4	0,3	-	7,45	0,44
5	0,29	6,28	7,30	0,47
6	0,32	7.13	6.84	0.45
7	0.22	6.45	7.13	0.43
8	0.32	6.72	7.19	0.42
9	0.32	6.95	7.21	0.42
10	0.32	6.90	7.26	0.42
11	0.32	6.65	6.87	0.41
12	0.30	6.72	6.85	0.42
13	0.30	6.80	6.97	0.38
14	0.32	6.58	6.81	0.37
15	0.31	6.70	6.85	0.40
16	0.27	6.85	6.83	0.39
17	0.27	6.80	6.81	0.41
18	0.29	6.83	6.85	0.38
19	0.31	6.73	6.88	0.37
20	0.31	6.85	7.00	0.36
21	0.13	6.60	7.04	0.35
22	0.28	6.75	7.01	0.35
23	0.25	6.60	7.02	0.36
24	0.29	6.53	6.83	0.30
25	0.31	6.58	6.88	0.33
26	0.26	6.60	6.84	0.37
27	0.29	6.95	6.92	0.33
28	0.31	6.9	6.83	0.37
29	0.37	7.2	6.94	0.36
30	0.29	7.13	6.98	0.35
31	0.30	7.01	7.08	0.33
32	0.30	7.08	7.06	0.31
33	0.29	7	7	0.3
34	0.27	6.59	7.1	0.31
35	0.28	6.66	7.02	0.36
36	0.29	6.82	6.98	0.33
37	0.29	6.5	7.01	0.3
38	0.30	6.33	6.99	0.35
39	0.31	6.44	6.91	0.29
40	0.29	6.51	6.93	0.32
41	0.37	6,69	6,85	0,38

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
42	0.42	6.7	7	0.38
43	0.35	6.75	7.03	0.36
44	0.29	6.81	7.05	0.35
45	0.20	6.72	6.83	0.35
46	0.29	6.76	6.94	0.33
47	0.30	6.87	6.89	0.34
48	0.34	7.38	6.98	0.33
49	0.40	7.03	7	0.32
50	0.28	6.76	6.99	0.28
51	0.14	6.81	7.05	0.31
52	0.29	7.11	6.99	0.36
53	0.27	7.14	6.95	0.35
54	0.31	7.5	6.94	0.38
55	0.28	7.15	6.9	0.31
56	0.29	7.14	6.79	0.34
57	0.11	7.3	7.02	0.33
58	0.26	7.24	7.12	0.34
59	0.36	6.7	6.97	0.32
60	0.40	6.26	7.02	0.3
61	0.28	6.7	7.03	0.32
62	0.29	6.95	7	0.36
63	0.35	6.83	6.92	0.35
64	0.42	7.14	7	0.33
65	0.32	6.99	6.99	0.26
66	0.31	7.02	7.1	0.34
67	0.25	7	7.13	0.29
68	0.43	7.3	7.12	0.27
69	0.21	7	7.05	0.28
70	0.20	7.3	7.05	0.29
71	0.14	6.9	7.03	0.3
72	0.40	6.95	7.09	0.3
73	0.40	6.46	7.01	0.33
74	0.51	6.73	6.95	0.34
75	0.35	6.79	7.01	0.33
76	0.44	7.35	7.09	0.31
77	0.17	7.2	6.96	0.32
78	0.61	7.05	7.03	0.31
79	0.36	6.66	7.15	0.29
80	0.59	6.8	7	0.33
81	0.60	6.72	7.01	0.33
82	0.66	6.71	6.9	0.38
83	0.50	7.02	6.9	0.36

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
84	0.70	6.9	7.1	0.36
85	0.71	6.95	7.02	0.32
86	0.89	6.74	6.9	0.38
87	0.60	6.65	7	0.36
88	0.69	6.85	7.04	0.31
89	0.71	6.66	7	0.34
90	0.71	6.98	6.92	0.42
91	0.86	6.71	6.98	0.36
92	0.79	6.94	7.11	0.31
93	0.83	6.77	7.13	0.33
94	0.75	6.26	6.99	0.38
95	0.74	7.16	7.03	0.34
96	0.73	7	7.03	0.34
97	0.74	6.75	7	0.34
98	0.71	6.9	7.04	0.36
99	0.86	6.86	7.07	0.32
100	0.97	7.3	7.11	0.36
101	0.71	6.91	7.1	0.31
102	1.01	7.46	7.02	0.29
103	1.40	6.98	7.2	0.29
104	0.45	6.9	7.1	0.29
105	1.00	7.16	7.22	0.24
106	1.18	7.13	7.15	0.3
107	1.17	7	7.1	0.31
108	0.92	6.83	7.25	0.26
109	1.20	6.93	7.19	0.26
110	1.20	6.93	7.2	0.26
111	1.41	6.7	7.3	0.25
112	1.47	6.61	7.31	0.23
113	1.58	7.07	7.45	0.21
114	1.67	7.18	7.2	0.27
115	2.19	6.65	7.18	0.26
116	2.10	7.14	7.24	0.25
117	2.04	6.66	7.35	0.28
118	2.02	6.65	7.5	0.21
119	2.33	7.2	7.4	0.22
120	2.36	7.09	7.18	0.27
121	2.66	7.15	7.21	0.26
122	3.18	7.02	7.26	0.23
123	2.71	7.13	7.22	0.2
124	2.84	6.85	7.33	0.26

125	2.68	6.72	7.38	0.21
-----	------	------	------	------

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
126	2.91	6.06	8	0.26
127	2.95	6.9	7.33	0.29
128	2.98	6.6	7.4	0.18
129	4.00	7.01	7.3	0.27
130	4.00	6.95	7.31	0.25
131	4.00	6.5	7.4	0.27
132	4.10	7.1	7.31	0.23
133	4.68	6.95	7.25	0.28
134	4.65	7.24	7.35	0.27
135	4.65	7.1	7	0.34
136	5.10	6.3	7.24	0.31
137	5.07	7.01	7.18	0.31
138	5.06	7.11	7.48	0.3
139	5.26	6.7	7.35	0.29
140	4.53	6.7	7.43	0.29
141	4.82	7.2	7.2	0.34
142	5.35	7.28	7.53	0.27
143	5.07	7.15	7.35	0.31
144	5.07	7.15	7.35	0.31
145	5.07	6.84	7.5	0.26
146	5.28	7	7.28	0.34
147	6.01	7.14	7.2	0.38
148	4.97	6.86	7.36	0.42
149	5.07	7.22	7.28	0.39
150	4.71	7.06	7.45	0.33
151	4.71	7.17	7.53	0.31
152	4.69	6.7	7.25	0.37
153	1.58	7.2	7.4	0.32
154	5.84	6.94	7.57	0.25
155	5.06	7.1	7.41	0.29
156	4.84	6.96	7.5	0.29
157	5.50	7.15	7.56	0.32
158	5.50	7.1	7.55	0.27
159	5.43	7.01	7.6	0.28
160	4.93	7.2	7.68	0.3
161	0.78	7.2	7.6	-
162	-	-	-	-
163	5.60	7.2	7.76	0.23
164	6.15	7.2	7.7	0.3
165	6.32	7	7.81	0.28
166	5.85	6.94	7.6	0.3

167	5.84	6.75	7.6	0.32
-----	------	------	-----	------

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g/l/d)	pHafuente	pHefluente	Factor Alcalinidad
168	5.97	6.75	7.69	0.3
169	6.17	6.8	7.41	0.32
170	5.37			0.32
171	5.49	6.75	7.6	0.31
172	5.35	6.87	7.56	0.33
173	5.52	6.75	7.25	0.4
174	6.48	6.75	7.47	0.45
175	5.94	6.51	7.27	0.39
176	5.14	6.58	7	0.48
177	5.80	6.82	7.34	0.39
178	5.99	6.55	7.48	0.39
179	5.95	6.32	7.37	0.42
180	5.99	6.33	7.4	0.44
181	5.57	6.33	7.21	0.45
182	6.00	6.56	7.15	0.49
183	5.87	6.7	7.26	0.48
184	5.46	6.76	7.36	0.51
185	5.34	6.73	7.34	0.52
186	5.34	6.52	7.15	0.47

B.2.- Valores diarios de DQO y Porcentaje de remoción en el Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//día)	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO(%)
6	0.32	1.65	1.6	53.49
7	0.22	1.14	1.64	-
8	0.32	1.64	1.22	25.61
9	0.32	1.64	1.22	25.61
10	0.32	1.64	1.22	25.61
11	0.32	1.64	1.22	25.61
12	0.30	1.52	1.37	9.87
13	0.30	1.52	1.37	9.87
14	0.32	1.56	1.77	-
15	0.31	1.66	0.96	42.17
16	0.27	1.54	0.8	48.05
17	0.27	1.49	0.75	49.66
18	0.29	1.49	0.75	49.66
19	0.31	1.61	0.66	59.01
20	0.31	1.61	0.66	59.01
21	0.13	1.62	0.41	74.69
22	0.28	1.49	0.65	56.38
23	0.25	1.32	0.58	56.06
24	0.29	1.58	0.58	63.29
25	0.31	1.58	0.58	63.29
26	0.26	1.38	0.43	68.84
27	0.29	1.38	0.43	68.84
28	0.31	1.64	0.32	80.49
29	0.37	1.61	0.33	79.50
30	0.29	1.62	0.38	76.54
31	0.30	1.64	0.32	80.49
32	0.30	1.64	0.32	80.49
33	0.29	1.61	0.35	78.26
34	0.27	1.61	0.35	78.26
35	0.28	1.64	0.25	84.76
36	0.29	1.64	0.25	84.76
37	0.29	1.6	0.26	83.75
38	0.30	1.63	0.26	84.05
39	0.31	1.63	0.26	84.05
40	0.29	1.63	0.26	84.05
41	0.37	1.61	0.37	77.02
42	0.42	1.63	0.38	76.69
43	0.35	1.58	0.32	79.75
44	0.29	1.61	0.42	73.91

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//día)	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO(%)
45	0.20	1.64	0.34	79.27
46	0.29	1.64	0.34	79.27
47	0.30	1.64	0.34	79.27
48	0.34	1.79	0.48	73.18
49	0.40	1.82	0.47	74.18
50	0.28	1.79	0.33	81.56
51	0.14	1.79	0.41	77.09
52	0.29	1.56	0.36	76.92
53	0.27	1.56	0.36	76.92
54	0.31	1.56	0.36	76.92
55	0.28	1.76	0.59	66.48
56	0.29	1.76	0.59	66.48
57	0.11	1.56	0.26	83.33
58	0.26	1.79	0.26	85.47
59	0.36	1.99	0.17	91.46
60	0.40	1.99	0.17	91.46
61	0.28	1.99	0.17	91.46
62	0.29	1.87	0.42	77.54
63	0.35	1.86	0.48	74.19
64	0.42	1.86	0.68	63.44
65	0.32	1.98	0.61	69.19
66	0.31	1.99	0.42	78.89
67	0.25	1.99	0.42	78.89
68	0.43	1.99	0.42	78.89
69	0.21	2.39	0.28	88.28
70	0.20	3.39	1.28	62.24
71	0.14	2.29	0.3	86.90
72	0.40	2.6	0.21	91.92
73	0.40	2.74	0.23	91.61
74	0.51	2.74	0.23	91.61
75	0.35	2.74	0.23	91.61
76	0.44	2.73	0.38	86.08
77	0.17	2.33	0.38	83.69
78	0.61	3.1	0.34	89.03
79	0.36	2.81	0.36	87.19
80	0.59	3.2	0.34	89.38
81	0.60	3.2	0.34	89.38
82	0.66	3.2	0.34	89.38
83	0.50	3.89	0.67	82.78

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//día)	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO(%)
84	0.70	3.89	0.67	82.78
85	0.71	3.89	0.67	82.78
86	0.89	4	0.67	83.25
87	0.60	4.1	0.78	80.98
88	0.69	4.1	0.78	80.98
89	0.71	4.1	0.78	80.98
90	0.71	4	0.76	81.00
91	0.86	4	0.82	79.50
92	0.79	4	0.77	80.75
93	0.83	4.1	0.83	79.76
94	0.75	3.84	1	73.96
95	0.74	3.84	1	73.96
96	0.73	3.84	1	73.96
97	0.74	4	0.99	75.25
98	0.71	3.65	0.98	73.15
99	0.86	4.4	1.07	75.68
100	0.97	4.4	1.06	75.91
101	0.71	4.2	0.84	80.00
102	1.01	5.2	1.84	64.62
103	1.40	6.2	2.84	54.19
104	0.45	3.7	0.78	78.92
105	1.00	5.1	0.79	84.51
106	1.18	6	0.62	89.67
107	1.17	6	0.71	88.17
108	0.92	6.14	0.67	89.09
109	1.20	6.14	0.67	89.09
110	1.20	6.14	0.67	89.09
111	1.41	6.78	0.77	88.64
112	1.47	7.11	0.89	87.48
113	1.58	8	1.1	86.25
114	1.67	8.3	0.89	89.28
115	2.19	10.5	0.77	92.67
116	2.10	10.5	0.77	92.67
117	2.04	10.5	0.77	92.67
118	2.02	10.5	0.72	93.14
119	2.33	12.1	0.94	92.23
120	2.36	12.1	1.11	90.83
121	2.66	12.1	1.4	88.43
122	3.18	13.71	1.05	92.34

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//día)	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO(%)
123	2.71	13.71	1.05	92.34
124	2.84	13.71	1.05	92.34
125	2.68	13.71	1.34	90.23
126	2.91	14.53	1.35	90.71
127	2.95	14.75	1.55	89.49
128	2.98	15.2	1.6	89.47
129	4.00	20.5	1.78	91.32
130	4.00	20.5	1.78	91.32
131	4.00	20.5	1.78	91.32
132	4.10	21.00	2.90	86.19
133	4.68	24.00	3.13	86.96
134	4.65	24.00	3.76	84.33
135	4.65	24.00	4.39	81.71
136	5.10	26.00	5.86	77.46
137	5.07	26.00	5.86	77.46
138	5.06	26.00	5.86	77.46
139	5.26	26.00	5.33	79.50
140	4.53	23.20	6.00	74.14
141	4.82	25.00	5.98	76.08
142	5.35	27.40	5.73	79.09
143	5.07	25.97	6.45	75.16
144	5.07	25.97	6.45	75.16
145	5.07	25.97	6.45	75.16
146	5.28	26.10	7.42	71.57
147	6.01	29.50	5.93	79.90
148	4.97	25.00	11.34	54.64
149	5.07	26.00	11.04	57.54
150	4.71	24.13	10.20	57.73
151	4.71	24.13	10.20	57.73
152	4.69	24.13	10.20	57.73
153	1.58	25.00	12.00	52.00
154	5.84	25.20	12.96	48.57
155	5.06	25.30	8.40	66.80
156	4.84	24.82	8.23	66.84
157	5.50	28.20	7.85	72.16
158	5.50	28.20	7.85	72.16
159	5.43	28.20	7.85	72.16
160	4.93	24.64	7.50	69.56
161	0.78	24.64	7.50	69.56

Continuación... Valores diarios de carga, pH y factor de alcalinidad. Digestor B

Día de operación	C.O.V (g//día)	DQO afluente (g/l)	DQO efluente (g/l)	Porcentaje de Remoción DQO(%)
162	-	-	-	-!
163	5.60	28.00	7.44	73.43
164	6.15	28.00	7.44	73.43
165	6.32	28.00	7.44	73.43
166	5.85	30.00	7.44	75.20
167	5.84	29.93	8.13	72.84
168	5.97	30.60	9.10	70.26
169	6.17	30.10	9.81	67.41
170	5.37	27.68	8.98	67.56
171	5.49	27.44	9.80	64.29
172	5.35	27.44	9.80	64.29
173	5.52	27.44	9.80	64.29
174	6.48	34.26	10.90	68.18
175	5.94	30.44	14.00	54.01
176	5.14	26.60	14.10	46.99
177	5.80	30.10	12.03	60.03
178	5.99	30.70	10.87	64.59
179	5.95	30.70	10.87	64.59
180	5.99	30.70	10.87	64.59
181	5.57	28.53	14.78	48.19
182	6.00	30.16	13.16	56.37
183	5.87	30.10	14.70	51.16
184	5.46	28.00	13.56	51.57
185	5.34	26.20	14.13	46.07
186	5.11	26.20	14.13	46.07

B.3.-. Valores diarios de producción, productividad y rendimiento. Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
6	4.25		0.04	3.72
7	3.4		0.03	-0.30
8	0		0.00	0.00
9	0		0.00	0.00
10	0		0.00	0.00
11	3.8		0.03	0.40
12	3.3		0.03	0.96
13	4.1		0.04	1.20
14	2.2		0.02	-0.44
15	2		0.02	0.13
16	4.95		0.04	0.32
17	5.57		0.05	0.35
18	3.73		0.03	0.22
19	5		0.04	0.25
20	2.9		0.03	0.13
21	8.65		0.08	0.76
22	5.75		0.05	0.31
23	2.25		0.02	0.14
24	5.65		0.05	0.26
25	3.55		0.03	0.16
26	4.05		0.04	0.20
27	4.15		0.04	0.17
28	3.65		0.03	0.12
29	8.8		0.08	0.25
30	8.85		0.08	0.34
31	5.85		0.05	0.21
32	5.15		0.05	0.18
33	4.95		0.04	0.18
34	9		0.08	0.36
35	5.95		0.05	0.22
36	5.3		0.05	0.19

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
37	6.85		0.06	0.33
38	6.95		0.06	0.38
39	6.65		0.06	0.11
40	7.4		0.06	0.21
41	7.95		0.07	0.29
42	7.1		0.06	0.15
43	5.79		0.05	0.04
44	8.3		0.07	0.07
45	5.75		0.05	0.30
46	4.55		0.04	0.07
47	6.7		0.06	0.14
48	6.4		0.06	0.20
49	6.3		0.06	0.25
50	6.05		0.05	0.18
51	3.5		0.03	0.17
52	5.9		0.05	0.11
53	6.05		0.05	0.09
54	5.6		0.05	0.11
55	6.65		0.06	0.07
56	2.35		0.02	0.11
57	1.9		0.02	0.34
58	2.5		0.02	0.28
59	2.7		0.02	0.49
60	3.1		0.03	0.25
61	5.3		0.05	0.28
62	5.6		0.05	0.29
63	6.05		0.05	0.00
64	7.05		0.06	0.00
65	8.8		0.08	0.07
66	9.6		0.08	0.59
67	7.2		0.06	0.25
68	7.7		0.07	0.24
69	9.65		0.08	0.20

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
70	4.9		0.04	0.33
71	3.1		0.03	0.21
72	6.05		0.05	0.14
73	6.95		0.06	0.16
74	8.3		0.07	0.15
75	8.05		0.07	0.21
76	9.05		0.08	0.20
77	3.7		0.03	0.22
78	7.2		0.06	0.11
79	4.6		0.04	0.12
80	7.95		0.07	0.13
81	9.05		0.08	0.14
82	10.1		0.09	0.15
83	11.2		0.10	0.23
84	11.3		0.10	0.17
85	9.2		0.08	0.13
86	13.3		0.12	0.15
87	9.3		0.08	0.16
88	12.9		0.11	0.20
89	14.25		0.13	0.21
90	12.8		0.11	0.19
91	12.95		0.11	0.16
92	11.25		0.10	0.15
93	10.95		0.10	0.14
94	12.9		0.11	0.20
95	13.1		0.11	0.20
96	15.1		0.13	0.24
97	15.6	65.98	0.14	0.24
98	15		0.13	0.25
99	17.2	79	0.15	0.23
100	13.1		0.11	0.15
101	8		0.07	0.12
102	15.8		0.14	0.21

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
103	21.85		0.19	0.25
104	22.95		0.20	0.55
105	25.1		0.22	0.25
106	14.8		0.13	0.12
107	26.5	82	0.23	0.22
108	28.9		0.25	0.30
109	30.1		0.26	0.24
110	32.3		0.28	0.26
111	34.5		0.30	0.24
112	44.1		0.39	0.29
113	42.6	81	0.37	0.27
114	49.3		0.43	0.28
115	57.1		0.50	0.24
116	59		0.52	0.26
117	58.05		0.51	0.26
118	52.45		0.46	0.24
119	52.4		0.46	0.21
120	53		0.46	0.21
121	84		0.74	0.31
122	91		0.80	0.26
123	105.6		0.93	0.36
124	100.1		0.88	0.33
125	74.9		0.66	0.26
126	97.4		0.85	0.32
127	90.1		0.79	0.29
128	87	68.6	0.76	0.28
129	78		0.68	0.18
130	83.7		0.73	0.20
131	93.4		0.82	0.22
132	95.9		0.84	0.23
133	99		0.87	0.21
134	100.5		0.88	0.22
135	103.3		0.91	0.23

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
136	123.3		1.08	0.27
137	114.4		1.00	0.25
138	136.9		1.20	0.30
139	118.3		1.04	0.24
140	124.9	68.6	1.10	0.32
141	96.3		0.84	0.22
142	139.4		1.22	0.28
143	132.9		1.17	0.30
144	123		1.08	0.28
145	151.2		1.33	0.34
146	122		1.07	0.28
147	99.1		0.87	0.18
148	131.9	68	1.16	0.41
149	110.9		0.97	0.32
150	137		1.20	0.43
151	107.4		0.94	0.34
152	122.5		1.07	0.39
153	116.4		1.02	1.21
154	73.1		0.64	0.22
155	110.9	71.7	0.97	0.28
156	117		1.03	0.31
157	115.15		1.01	0.25
158	110.85		0.97	0.24
159	114.85		1.01	0.25
160	103.45		0.91	0.26
161	103.1		0.90	1.63
162	81.5		0.71	-!
163	61.1		0.54	0.13
164	96.5		0.85	0.18
165	84.8		0.74	0.16
166	86.3		0.76	0.17
167	103.3		0.91	0.21
168	101.5	65	0.89	0.21

Continuación... Valores diarios de producción, productividad y rendimiento.
Calidad de biogás (porcentaje de metano) en el digestor B

Día de operación	Producción de biogás (l)	Porcentaje de metano	Productividad (l biogás/l digestor)	Rendimiento (l CH₄/gDQO_{removido})
169	86.9		0.76	0.27
170	113.3		0.99	0.25
171	102.8	69.8	0.90	0.29
172	116.7		1.02	0.31
173	128.1		1.12	0.24
174	122.1		1.07	0.29
175	107.5		0.94	0.34
176	96.6	65.3	0.85	0.25
177	102.7		0.90	0.15
178	70	72.8	0.61	0.24
179	109.8		0.96	0.19
180	86.5		0.76	0.24
181	75.3		0.66	0.19
182	75.5	53.3	0.66	0.34
183	120.8	55.3	1.06	0.22
184	73.2		0.00	0.36
185	102.8	66	0.00	0.32
186	88.1		0.00	0.27

B.4.-. Concentración de nitrógeno Total. Relación DQO:NT en el Digestor A

Día	DQO	Conc.NT B (g/l)	DQO : NT
38	1.63	0.05	350 : 10
52	1.56	0.05	350 : 11
59	1.99	0.05	350 : 9
70	3.39	0.06	350 : 6
89	4.10	0.08	350 : 6
105	5.10	0.07	350 : 5
115	10.50	0.17	350 : 6
120	12.10	0.18	350 : 5
125	13.71	0.22	350 : 6
130	20.50	0.24	350 : 4
133	24.00	0.25	350 : 4
142	27.40	0.45	350 : 6
155	25.30	0.39	350 : 5
161	24.64	0.48	350 : 7
165	28.00	0.50	350 : 6
167	29.93	0.73	350 : 9
174	34.26	0.50	350 : 5
181	28.53	0.70	350 : 9

B.5.-. Concentración de Nitrógeno amoniacal en el Digestor B

Día	COV	Conc. NH3 (g/l)
45	0.20	0.05
48	0.34	0.06
51	0.14	0.04
58	0.26	0.04
62	0.29	0.04
92	0.79	0.06
96	0.73	0.07
112	1.47	0.07
125	2.68	0.10
133	4.68	0.13
145	5.07	0.29
156	4.84	0.26
164	6.15	0.37
167	5.84	0.37
178	5.99	0.56
185	5.34	0.70

B.6.-. Comportamiento de Sólidos Suspendidos en el Digestor B

Día de operación	Carga	SST(g/l)	SSV (g/l)	SSV/SST (%)
105	1.00	0.41	0.26	62.99
113	1.58	0.31	0.22	73.29
115	2.19	0.52	0.28	53.64
119	2.33	0.55	0.28	51.25
126	2.91	0.57	0.24	43.16
128	2.98	0.85	0.64	74.96
135	4.65	0.78	0.56	71.33
143	5.07	1.47	0.88	60.00
147	6.01	0.73	0.51	69.56
154	5.84	1.19	0.93	78.42
178	5.99	1.36	1.13	83.24
181	5.57	1.77	1.53	86.15
185	5.34	1.32	1.13	85.61

Anexo C.1.-. Parámetros fisicoquímicos de los sustratos floculado y no floculado

Sustrato No Floculado					Sustrato No Floculado			
Fecha	pH	NT (g/l)	ST (g/l)	SV (g/l)	pH	NT (g/l)	ST (g/l)	SV (g/l)
28-03-06	4.20	-	-	-	4.95	-	-	-
12-04-06	5.12	1.12	-	-	5.10	0.56	-	-
30-04-06	4.90	-	-	-	4.45	-	-	-
02-05-06	6.00	-	47.51	36.95	5.05	-	24.13	18.06
05-05-06	5.80	-	-	-	4.60	-	-	-
16-05-06	4.61	1.13	-	-	5.00	0.46	-	-
04-06-06	5.25	-	-	-	4.81	-	-	-
20-06-06	5.51	-	-	-	4.59	-	-	-
30-06-06	4.09	1.05	-	-	5.00	0.49	-	-
05-07-06	4.28	-	-	-	4.07	-	-	-
08-07-06	5.78	-	50.25	37.94	5.00	-	26.66	19.23
10-07-06	4.19	-	-	-	4.14	-	-	-
15-07-06	5.66	-	-	-	4.31	-	-	-
18-07-06	5.81	1.15	-	-	4.69	0.50	-	-
09-08-06	5.79	-	-	-	4.82	-	-	-
10-08-06	6.01	-	46.51	37.05	4.14	-	24.27	18.59
15-08-06	5.99	-	-	-	5.00	-	-	-
19-08-06	5.55	1.12	-	-	4.98	0.48	-	-
22-08-06	5.96	-	48.64	37.15	4.59	-	24.00	18.36
08-09-06	4.34	1.12	-	-	4.69	0.49	-	-

Anexo C.2.-. Caracterización de lodos de los digestores A y B

Procedencia	ST (g/l)	SV (g/l)	SV/ST	pH	Color	Tipo
Digestor CIPRES	19.69	11.07	0.56	7.26	Negro	Floculante
Digestor PROINCASA	9.53	5.43	0.57	7.23	Negro	Floculante

Anexo D.- Datos Técnicos de los equipos utilizados

Tanques de alimentación

No	2
Material	Acero inoxidable
Longitud	2.10 m
Diámetro interno	0.15 m
Volumen total	37.1 L
Llaves de paso	4

Embudo de alimentación

No	2
Material	Acero inoxidable
Diámetro interno	0.15 m
Longitud	0.6 m
Volumen total	3.5 L
Llaves de paso	2

Tanques para digestión

No	2
Material	Acero inoxidable
Diámetro interno	0.25 m
Longitud	2.06 m
Volumen total	101 L
Volumen útil	82 L
Llaves de paso	4

Embudo de digestión

No	2
Material	Acero inoxidable
Diámetro interno	0.25 m
Longitud	0.82 m
Volumen total	13.4 L
Llaves de paso	2

Bomba recirculación alimentación

Tipo	Bomba de cabezal
Marca	Meredos GmbH
Modelo	SP-GU-150
Diámetro de cabezal	82 mm
Capacidad	19.2 L/h
Voltaje	220

Bomba alimentación digestor A

Tipo	Bomba de cabezal
Marca	VERDER
Modelo	504U IP55
Capacidad	212 L/h
Voltaje	220

Bomba alimentación digestor B

Tipo	Bomba de cabezal
Marca	Meredos GmbH
Modelo	Meredos GmbH
Diámetro de cabezal	62 mm
Capacidad	10.68 L/h
Voltaje	220

Bomba recirculación digestor A

Tipo	Bomba de engranaje
Marca	VERDER
Modelo	2036 AUTO V 288.06
Capacidad	288 l/h
Voltaje	110

Bomba recirculación digestor B

Tipo	Bomba de engranaje
Marca	VERDER
Modelo	2036 AUTO V 006.10
Capacidad	6 L/h
Voltaje	110

Contador de Gas

No	2
Tipo	Flujómetro de tambor
Marca	Ritter
Modelo	TG 05

Válvulas

No	24
Tipo	Esférica
Material	Acero inoxidable
Diámetro	1/2 pulgada

Manguera

No	30 m
Material	Plástico

Balde

No	4
Material	Plástico
Capacidad	20 L

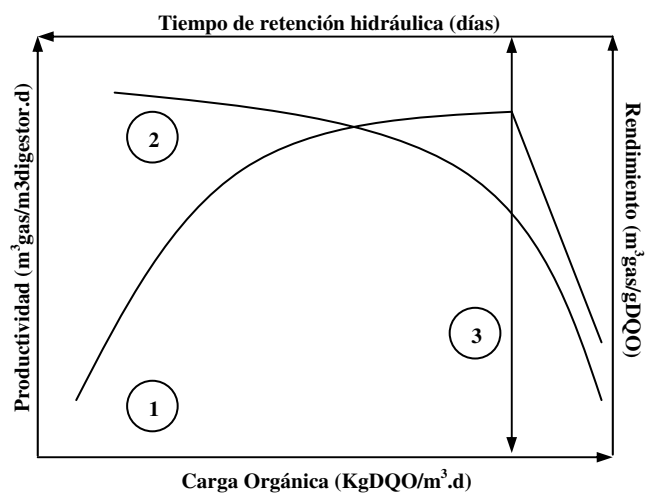
Barril

No	1
Material	Plástico
Capacidad	208 L

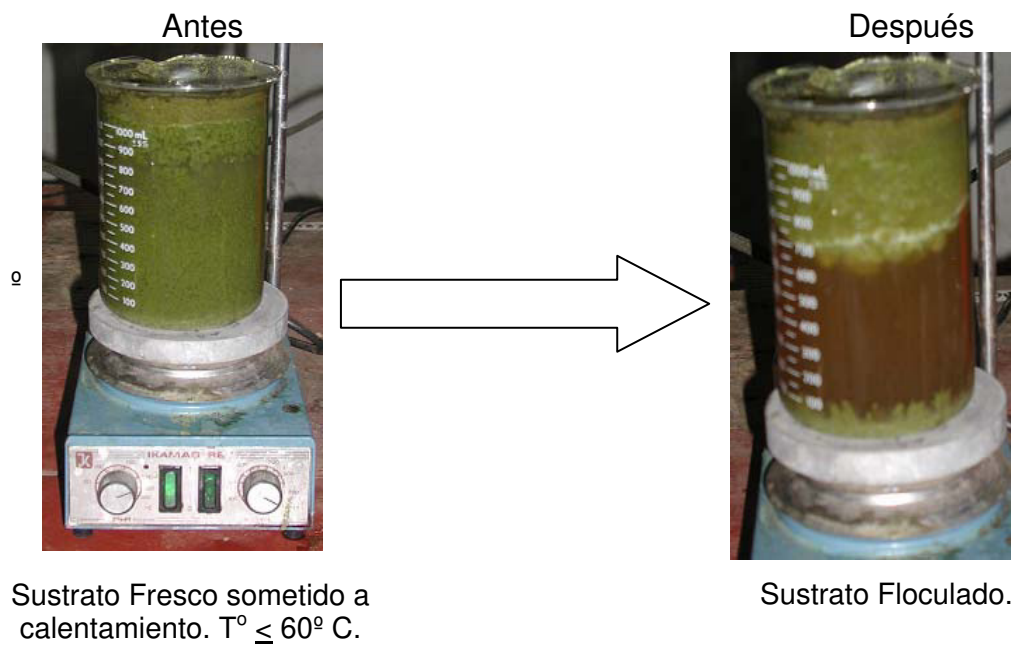
ANEXO E

FIGURAS

E.1.-. Rendimiento vs. Productividad y Tiempo de Retención⁴⁷



E.2.-.Procedimiento de Floculación de proteína



⁴⁷ Seminario sobre tratamiento anaeróbico de las aguas residuales orgánicas. N. Foidl et, all

E.3.- Componentes principales de los módulos de digestión



1.- Contador de gas 2.- Trampa de gas 3.- Digestor 4.- Sonda
Térmica 5.- Tanque de alimentación